SICUREZZA NELLE GALLERIE FERROVIARIE

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE ED AMBIENTALE

INGEGNERIA DELLE INFRASTRUTTURE VIARIE E DEI TRASPORTI

SICUREZZA NELLE GALLERIE FERROVIARIE:

MODELLAZIONE NUMERICA DEI TUNNEL PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO D'INCENDIO

TESI DI LAUREA IN INGEGNERIA CIVILE

GIUSEPPE FRESTA

A.A. 2007/08

RELATORE

Prof. Ing. Salvatore LEONARDI

CORRELATORE

Dott. Ing. Marco Santo SPINELLI

ABSTRACT

Il rapido incremento di potenza computazionale che nell'ultimo decennio ha interessato i personal computer ha reso conveniente l'investimento di tempo e risorse nell'impiego di modelli deterministici di calcolo basati sulla soluzione delle equazioni differenziali che governano i complessi fenomeni fluidodinamici e chimici coinvolti nell'incendio.

Ciò ha determinato la rapida diffusione di modelli di calcolo notevolmente complessi e versatili, in grado di affrontare lo studio di molteplici tipologie di scenari di incendio. Tale circostanza rappresenta un vantaggio ed una opportunità, ma costituisce altresì un rischio per chi "acquista" le informazioni prodotte dai modelli, in quanto la significatività ed attendibilità dei risultati è subordinata ad una profonda conoscenza dei fenomeni dell'incendio e delle approssimazioni che i vari sottomodelli implementati contengono.

Il mondo ferroviario ha colto con tempestività tale opportunità, coltivando e sviluppando metodologie innovative per la valutazione delle situazioni potenzialmente rischiose sulle proprie infrastrutture; oggi vengono sviluppate analisi di rischio probabilistiche supportate dall'impiego di molteplici modelli deterministici dedicati all'analisi degli scenari di incendio, grazie ad un approccio ormai consolidato ma in continuo sviluppo ed evoluzione.

Obiettivo principale della presente tesi di laurea è stato quello di definire completamente e correttamente una metodologia per la valutazione deterministica del danno al ricettore uomo nell'eventualità dell'incendio di un tunnel, attraverso un percorso coerente di studio e sperimentazione concretizzatosi nella "costruzione e validazione di un modello numerico di simulazione dell'incendio e dell'esodo in galleria ferroviaria".

SOMMARIO

1 INTRODUZIONE 9

1.1 LA SICUREZZA IN GALLERIA FERROVIARIA 9

1.2 OBIETTIVI DEL LAVORO 10

2 VALUTAZIONE QUANTITATIVA DI UN INCENDIO 15

2.1 L'APPROCCIO INGEGNERISTICO ALLA SICUREZZA ANTINCENDIO 15

2.2 DESCRIZIONE GENERALE DELLA COMBUSTIONE E DEI SUOI PRODOTTI 15

2.3 COMPOSIZIONE DI UNA FIAMMA 18

2.4 TEMPERATURA DI UNA FIAMMA 20

2.5 IL MECCANISMO DELLA COMBUSTIONE 21

2.5.1 L'innesco 21

2.5.2 La propagazione degli effluenti dell'incendio 22

2.5.3 Il flashover 25

2.5.4 La componente radiante delle fiamme 26

2.5.5 La componente convettiva delle fiamme 26

2.6 LE CURVE DI RILASCIO TERMICO 26

2.6.1 Il tasso del rilascio termico: la grandezza HRR 28

2.6.2 Fuochi stazionari e non stazionari 29

2.7 CORRELAZIONI PER IL CALCOLO DELLA TEMPERATURA 32

2.7.1 La correlazione di Heskestad 33

2.7.2 Stima della Temperatura dei ceiling jet 35

2.7.3 La correlazione di Alpert 35

2.7.4 La correlazione di Heskestad & Delichatsiosis 36

2.7.5 La correlazione di Alpert & Ward 37
2.8 LA PRODUZIONE DI FUMO 37
2.8.1 Il movimento dei fumi 39
2.9 COMPOSIZIONE DEI GAS COMBUSTI E PERICOLOSITÀ 40
2.9.1 Ossido di carbonio - CO 41
2.9.2 Anidride carbonica - CO_2 41
2.9.3 Acido cianidrico - HCN 41
2.9.4 Fosgene - $COCl_2$ 42
2.9.5 Idrogeno solforato - H_2S 42
2.9.6 Ammoniaca - NH_3 42
2.9.7 Acido cloridrico - HCl 42
2.9.8 Aldeide acrilica - CH_2CHCHO 43
2.9.9 Anidride solforosa - SO_2 43
2.9.10 Ossidi di azoto - NO_x 43
2.9.11 Formaldeide - CH_2O 43

3 ASPETTI CARATTERISTICI DI UN INCENDIO IN GALLERIA 45
3.1 INTRODUZIONE 45
3.2 LA TEMPERATURA E LE CURVE D'INCENDIO 46
3.2.1 Le curve di incendio in generale 47
3.2.2 La curva di incendio di materie cellulosiche ISO 834 48
3.2.3 La curva di incendio da idrocarburi 48
3.2.4 La curva RWS o UNI 11076 49
3.2.5 La curva di incendio RABT ZTV 50
3.2.6 La curva di incendio da idrocarburi modificata 50
3.3 VALORI DI PROGETTO PER L'HRR IN GALLERIA 51
3.4 I TEST E LE ESPERIENZE DI LABORATORIO 53
3.5 PROPAGAZIONE E TEMPERATURA DI UN INCENDIO IN GALLERIA 56
3.5.1 L'esperienza di Kurioka 59
3.5.2 Evoluzioni della correlazione di Kurioka 64
3.6 IL FENOMENO DEL BACKLAYERING 65
3.7 EFFETTO DELLA VENTILAZIONE IN GALLERIA 66
3.7.1 Effetto della ventilazione sulla lunghezza di fiamma 67

3.7.2 Influenza della ventilazione sulla magnitudo 68
3.7.3 Il fenomeno della pulsazione 68

4 LE GALLERIE FERROVIARIE E LA SICUREZZA 71
4.1 INTRODUZIONE 71
4.2 GENERALITÀ 71
4.3 IL SISTEMA GALLERIA 73
4.3.1 Elementi strutturali 73
4.3.2 Installazioni e sistemi tecnici 74
4.4 IL PROGETTO DELLA SEZIONE 75
4.4.1 Standard di riferimento progettuali del gruppo FS 75
4.5 IL PROGETTO DEGLI IMPIANTI 79
4.5.1 Impianto idrico antincendio 80
4.5.2 Impianto elettrico e di illuminazione 80
4.5.3 Impianto di telecomunicazione 82
4.5.4 Sistema di supervisione degli impianti 84
4.6 INFLUENZA DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI TUNNEL SULLA SICUREZZA 85
4.6.1 Tunnel a singola canna e singolo binario 85
4.6.2 Tunnel a singola canna e singolo binario con segnali di blocco 86
4.6.3 Tunnel a singola canna e doppio binario 86
4.6.4 Tunnel a doppia canna gemellati 87
4.6.5 Tunnel a singola o doppia canna con tunnel di servizio 88
4.7 MODALITÀ OPERATIVE PER IL MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA 89
4.7.1 Il miglioramento della sicurezza per le gallerie esistenti 89
4.7.2 Il miglioramento della sicurezza per nuove gallerie 92
4.8 NORMATIVA ITALIANA SULLE GALLERIE FERROVIARIE 94
4.8.1 Decreto Ministeriale del 14 settembre 2005 94
4.8.2 Decreto Ministeriale del 28 ottobre 2005 95
4.9 STATO NORMATIVO A LIVELLO EUROPEO 98
4.10 L'ALLEGATO II DEL DM 28/10/2005 99
4.10.1 Requisiti minimi 101
4.10.2 Requisiti integrativi 103
4.11 L'ALLEGATO III DEL DM 28/10/2005 - ANALISI DI RISCHIO 104

4.11.1 Scenari Incidentali di riferimento 105
4.11.2 Accettabilità del rischio 107
4.11.3 Analisi di rischio base (ARB) 109
4.11.4 ANNESSO A - Schema indicativo delle fasi operative dell'analisi di rischio 111
4.11.5 ANNESSO B - Lista preliminare degli eventi pericolosi e delle cause 113
4.11.6 ANNESSO C - Banche dati incidentali 114
4.11.7 ANNESSO D_1 - Descrizione dell'ARB in ambito probabilistico 115
4.11.8 ANNESSO D_2 - Descrizione del modello deterministico di riferimento 117

5 LE GALLERIE FERROVIARIE IN ESERCIZIO 123
5.1 LE GALLERIE FERROVIARIE PIÙ LUNGHE DEL MONDO 123
5.1.1 La galleria di base del San Gottardo 123
5.1.2 La galleria del Seikan 125
5.1.3 La galleria sotto la Manica 127
5.1.4 La galleria base del Lotschberg 128
5.1.5 La galleria di Guadarrama 129
5.2 LE GALLERIE FERROVIARIE PIÙ LUNGHE D'ITALIA 129
5.2.1 La galleria del Sempione 130
5.2.2 La galleria di Vaglia 131
5.2.3 La galleria dell'Appennino 131
5.3 SINTESI DEI PRINCIPALI ACCADIMENTI INCIDENTALI 131
5.3.1 I casi reali d'incendio in galleria 132
5.3.2 Altri tipi di incidenti gravi in galleria 134
5.3.3 Riepilogo dei casi gravi 135
5.3.4 Considerazioni sugli incendi delle Torri Gemelle del 2001 140

6 EFFETTI DELL'INCENDIO SULLA VITA UMANA 143
6.1 INTRODUZIONE 143
6.2 EFFETTO DEI GAS SULL'ORGANISMO UMANO 144
6.2.1 Modelli di previsione dell'esposizione 145
6.2.2 La Fractional Effective Dose 147
6.2.3 La Fractional Effective Concentration 149
6.3 LA VISIBILITÀ NELLE VIE DI ESODO 150

6.3.1 L'impatto del fumo sul movimento 151
6.4 EFFETTI DEL CALORE SUL CORPO UMANO 152
6.5 APPROFONDIMENTI SULLA MORTE PER ASFISSIA 154

7 IL COMPORTAMENTO UMANO NELL'INCENDIO 159
7.1 INTRODUZIONE 159
7.2 L'INTERAZIONE UOMO-PERCORSO-AMBIENTE 160
7.3 LE CARATTERISTICHE DEGLI OCCUPANTI 162
7.4 LA RISPOSTA AGLI INDIZI 165
7.5 L'ASPETTO PSICOLOGICO DELL'EVACUAZIONE 166
7.5.1 Le famiglie e la familiarità dei percorsi 167
7.5.2 Le decisioni e lo stress 167
7.5.3 Effetti di tipo sociale: maggioranze e minoranze 168

8 I MODELLI COMPUTAZIONALI 169
8.1 INTRODUZIONE ALLA MODELLAZIONE NUMERICA 169
8.2 I MODELLI NUMERICI CFD 170
8.2.1 Modelli a zone 171
8.2.2 Modelli di campo 172
8.2.3 Modelli post-flashover 173
8.2.4 Modelli multifunzionali 173
8.3 I MODELLI NUMERICI DI EVACUAZIONE 174
8.3.1 Caratteristiche generiche di un modello di evacuazione 174

9 APPROFONDIMENTI SUL CODICE FDS+EVAC 177
9.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CAMPO 177
9.2 DESCRIZIONE TECNICA DEL SOFTWARE 178
9.2.1 Il problema delle superfici curvilinee o inclinate 179
9.3 LA COMBUSTIONE E IL TRASPORTO DI CALORE IN FDS 180
9.4 IL MODELLO DI EVACUAZIONE EVAC 182
9.5 L'ALGORTIMO DI MOVIMENTO 183
9.5.1 Il processo di selezione delle uscite 187

9.5.2 I gruppi 189
9.6 ESEMPIO APPLICATIVO DEL CODICE FDS 189

10 COSTRUZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO 193
10.1 GENERALITÀ 193
10.2 IL PROBLEMA DELLA GRIGLIA DI CALCOLO 193
10.2.1 Criteri generali 196
10.2.2 Ottimizzazione matematica della griglia 196
10.3 L'ESPERIENZA DEL RUNEHAMAR TUNNEL COME RIFERIMENTO 197
10.3.1 Studio per la definizione della griglia di calcolo 201
10.3.2 Studio sul parametro HRRPUA 205
10.3.3 Studio sul parametro CO_YIELD 210
10.3.4 Studio di osservazione sull'effetto della ventilazione 213
10.4 CONSIDERAZIONI SULLA TEMPERATURA MASSIMA NEI TUNNEL 215

11 DEFINIZIONE E STUDIO DI UNA CLASSE DI SCENARI PER L'ANALISI DEI RISULTATI DEL MODELLO 217
11.1 INTRODUZIONE 217
11.2 DEFINIZIONE DI UNA CLASSE DI SCENARI RILEVANTI DI PROGETTO 218
11.2.1 Scenari Base o di Riferimento 219
11.2.2 Scenari Derivati 232
11.2.3 Scenari Rilevanti di Progetto 241
11.3 QUANTIFICAZIONE DEL FLUSSO DEL PERICOLO 243

12 CONCLUSIONI 249
12.1 CONCLUSIONI 249
12.2 SULL'ASPETTO TECNICO DELLE SIMULAZIONI 251

BIBLIOGRAFIIA 253

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

1.1 LA SICUREZZA IN GALLERIA FERROVIARIA

Negli ultimi anni diversi e molteplici sono stati gli incidenti che hanno avuto serie conseguenze per la comunità e che sono avvenuti all'interno di tunnel ferroviari, stradali o di linee metropolitane. Questo ha posto il problema della sicurezza in galleria sull'agenda pubblica di molti paesi. Gli aspetti che forniscono maggiori preoccupazioni riguardano tutti quei tunnel, indipendentemente dalla loro natura, che hanno un'elevata estensione longitudinale o che presentano elevati livelli di traffico in rapporto alla propria lunghezza.

Con l'entrata in vigore del DM 28/10/2005 - "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" (GU n. 83 dell'8 aprile 2006) viene profondamente modificato e per la prima volta organicamente regolamentato l'approccio alla domanda/offerta di sicurezza nel trasporto ferroviario in galleria da parte di quanti, utenti, imprese di trasporto, gestori di rete, decisori politici ed istituzionali, risultano a vario titolo coinvolti in tale contesto: ad ognuno di essi è affidato un compito proporzionale al ruolo ricoperto al fine di garantire l'obiettivo della sicurezza del sistema ferroviario italiano.

Gli incidenti nei tunnel ferroviari, alla stessa stregua di quelli che occorrono generalmente nelle gallerie stradali, presentano le caratteristiche proprie dei cosiddetti "eventi rari o eccezionali", ossia con bassa frequenza di accadimento e con magnitudo delle conseguenze spesso elevata.

Si deve notare inoltre che, per la sua particolare conformazione orografica, l'Italia è uno dei Paesi più ricchi di tunnel ferroviari. Sulla base dei dati pubblicati dalle Ferrovie dello Stato, la rete ferroviaria italiana ad oggi in esercizio e in gestione al Gruppo FS possiede una estensione di circa 16200 km. Le gallerie sono oltre 2000 e raggiungono uno sviluppo di circa 1380 km, rappresentando dunque l'8,5% del totale dell'intera rete ferroviaria; a queste vanno poi aggiunte quelle in costruzione e di prossima apertura: 113 per una estensione di circa 188 km. Le gallerie previste o in progettazione sono invece 126 per una estensione complessiva di circa 370 km.

Se si considera, poi, il fatto che un'elevata percentuale dei tunnel ferroviari

(comprendenti anche le gallerie metropolitane presenti negli ambiti urbani e periurbani) si sviluppa (e si svilupperà in futuro) su tracciati di estensione maggiore di 2000 metri, risulta ancora più evidente come tali elementi infrastrutturali rappresentino le componenti potenzialmente più critiche per l'intero sistema di trasporto su ferro, in quanto realizzano una configurazione spaziale tale per cui il verificarsi di un eventuale incidente ne comporta un'amplificazione rilevante delle conseguenze.

1.2 OBIETTIVI DEL LAVORO

Ci sono due aspetti fondamentali da tenere in considerazione quando si tratta la sicurezza di un tunnel.

Il primo aspetto riguarda la sicurezza delle persone all'interno del tunnel, per le quali è di maggiore interesse lo sviluppo di calore e di fumo. In questo caso il progetto del sistema è relativo al movimento del fumo basato, fondamentalmente, sul valore di HRR[1] del fuoco.

Il secondo importante aspetto è la resistenza delle strutture durante l'incendio. In questo caso è la temperatura l'aspetto più importante e possono usarsi diversi tipi di curve temperatura-tempo per rappresentare il carico di calore potenziale sulla struttura.

La curva temperatura-tempo e la curva HRR sono spesso sviluppate in riferimento l'una all'altra, poiché entrambe sono chiamate a rappresentare lo stesso scenario.

Obiettivo di questi tesi di laurea è quello di studiare la sicurezza in galleria ferroviaria in caso d'incendio con riguardo alla sola salvabilità delle persone.

Per raggiungere l'obiettivo posto si intende studiare in primo luogo il quadro normativo nazionale ed internazionale, con particolare riferimento alla normativa italiana.

Il Decreto Ministeriale del 25 Ottobre 2005 "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" introduce

---

[1] Acronimo di **H**eat **R**elease **R**ate. L'insieme dei dati che per un dato materiale o prodotto definiscono il rilascio di calore nel tempo è riassumibile nelle curve di rilascio termico. L'informazione fondamentale che forniscono queste curve è quella del tasso del rilascio termico, definito nella letteratura anglosassone come Heat Release Rate. Il termine "rate", rateo o tasso, indica infatti la misura dell'energia termica rilasciata nell'unità di tempo [Potenza] e si riferisce ad una combustione in eccesso d'aria.

la nuova logica dell'approccio prestazionale, come metodologia efficace e moderna da affiancare al tradizionale quadro prescrittivo, fornendo a corredo della strategie di progetto e verifica della sicurezza l'innovativo strumento dell'analisi di rischio.

Nella pratica ingegneristica, il concetto di sicurezza è strettamente connesso al concetto di rischio: tanto minore è il rischio tanto maggiore può dirsi, in un certo senso, la sicurezza.

Figura 1.1 - Ingresso del Khuntan Tunnel in Thailandia, lungo 1352 m.

La norma introduce i requisiti minimi di sicurezza che deve possedere una galleria correttamente strutturata e garantisce, per una determinata classe di lunghezze e regimi di esercizio, la validità e l'efficienza di tali requisiti come unica strategia di sicurezza, ovvero come strategia necessaria e sufficiente al raggiungimento degli obiettivi di sicurezza.

Per le ulteriori classi di lunghezze e regimi di esercizio, accanto ai requisiti minimi vengono proposti dei requisiti integrativi. Il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza deve allora essere garantito confrontando i livelli di rischio residui con predefinite soglie di accettabilità.

Vengono distinte due tipologie di analisi: l'**A**nalisi di **R**ischio **B**ase **ARB** e l'**A**nalisi di **R**ischio **E**stesa **ARE**, ove la prima prende in considerazione un solo scenario incidentale (incendio), mentre la seconda studia tutti i possibili scenari incidentali di riferimento (incendio, deragliamento, collisione).

L'ARB si pone pertanto come il metodo attraverso il quale è possibile affermare l'efficienza dei requisiti minimi come strategia fondamentale di sicurezza.

L'ARE si pone invece come strumento di maggiore potenza per estendere il campo di applicazione dell'analisi a quei casi nei quali la sola esistenza dei requisiti minimi non è sufficiente a garantire la sicurezza, per via delle caratteristiche complessive del sistema tunnel.

L'ARB è dunque una procedura mirata alla verifica dell'incolumità e quindi della salvabilità dei passeggeri, ipotizzando e simulando uno scenario in cui la sopravvivenza dei passeggeri è condizionata essenzialmente dall'autosoccorso.

Assume così particolare rilievo lo scenario incidentale che prevede il simultaneo verificarsi di incendio e perdita di mobilità del rotabile.

La procedura suggerita dalla norma, per la definizione dell'analisi di rischio, si basa sulle elaborazioni di un simulatore che descrive l'esodo all'interno della galleria fino al raggiungimento dell'uscita della galleria stessa e sulla base del quale è possibile caratterizzare la distribuzione del danno relativamente ad un convoglio prototipo.

L'utilizzo di strumenti informatici e di scenari di progetto opportunamente costruiti permettono così di effettuare, con un errore del tutto accettabile e con opportuni coefficienti di sicurezza cautelativi, una ricostruzione virtuale dello scenario preso a riferimento e di trarre da esso la validità dei requisiti di sicurezza.

Lo studio di questa tesi si pone pertanto l'obiettivo di indagare sugli strumenti che permettono di produrre l'Analisi di Rischio, evidenziandone i limiti e le approssimazioni, al fine di possedere completamente la metodologia per la valutazione del danno al ricettore uomo nel caso d'incendio in galleria ferroviaria.

Si passerà così dallo studio generale del fuoco e dei prodotti della combustione alla identificazione dei limiti relativi alla sua modellazione matematica, evolvendo ancora questo percorso con lo studio delle dinamiche proprie degli incendi interni ai tunnel nonché delle esperienze che hanno permesso di validare le teorie primitive e derivare quelle attuali.

Lo studio dei casi reali d'incendio permetterà poi di osservare e definire le cause principali dei decessi causati dagli incendi in galleria, fornendo un primo strumento d'analisi sul comportamento umano e sul rischio a cui l'uomo si espone nell'eventualità di un episodio drammatico come quelli studiati.

A tal proposito si approfondiranno la teoria psicologica del comportamento umano sotto stress decisionale e la sua capacita fisica di risposta all'esposizione a condizioni sfavorevoli, studiando modelli comportamentali e modelli di esposizione.

Un'ulteriore e fondamentale parte di questo lavoro riguarderà lo studio della fluido dinamica computazionale, ovvero lo studio dei modelli CFD presenti sul mercato e delle loro implementazioni e varianti, con particolare riferimento al software di simulazione dell'incendio FDS (Fire Dynamics Simulator - v. 5.x) sviluppato dal NIST (National Institute of Standards and Technology) e del suo modulo aggiuntivo EVAC sviluppato dal VTT (Technical Research Centre of Finland) per la simulazione e la stima dell'evacuazione degli occupanti.

L'obiettivo finale sarà pertanto quello di costruire e validare alcuni scenari d'incendio in galleria, tramite il supporto degli strumenti informatici FDS ed EVAC.

CAPITOLO 2

VALUTAZIONE QUANTITATIVA DI UN INCENDIO

2.1 L'APPROCCIO INGEGNERISTICO ALLA SICUREZZA ANTINCENDIO

L'approccio alla valutazione ingegneristica della sicurezza antincendio è stato formalizzato da un organo di normazione internazionale per la prima volta nel 1999, con il rapporto tecnico **ISO TR 1 3387 - Fire Safety Engineering**.

Tuttavia, la Fire Safety Engineering è una disciplina recente soltanto in parte. La diffusione e lo studio delle teorie che permettono di indagare sulle caratteristiche di un fuoco, è un fatto che ha cominciato ad avere sviluppo intorno agli anni '70. Da quegli anni ad oggi numerosissimi sono stati gli esperimenti che hanno permesso di costruire e validare le teorie attuali. Ciò nonostante il fuoco resta ancora un fenomeno codificato solo parzialmente, data la natura molecolare della sue caratteristiche derivanti in prevalenza da azioni di natura chimica e dunque difficili da prevedere a livello macroscopico.

Tra i diversi aspetti che possono essere messi in luce, uno di quelli che emerge in modo più rilevante riguarda l'importanza di definire in modo oggettivo lo scenario di riferimento, cioè il contesto nel quale la combustione si manifesta. Senza una definizione precisa dello scenario, che deve avvenire necessariamente caso per caso, non ha senso parlare di applicazione dell'ingegneria alla soluzione di problemi di progettazione o verifica della sicurezza.

2.2 DESCRIZIONE GENERALE DELLA COMBUSTIONE E DEI SUOI PRODOTTI

Prima di affrontare le complesse problematiche connesse all'evoluzione di un incendio, è opportuno convenire su alcuni concetti basilari, la cui corretta comprensione risulta indispensabile per l'inquadramento complessivo dei vari approcci.

Si intende per incendio (o combustione) una reazione chimica indesiderata che si sviluppa tra due sostanze, il combustibile ed il comburente, a seguito di un innesco, in un ambiente non destinato a tale scopo. Il combustibile è una sostanza, per lo più organica, costituita da carbonio ed idrogeno; il comburente è una sostanza ossidante, come

l'ossigeno presente nell'aria ed in alcuni composti (nitrati, clorati, perclorati, permanganati, perossidi).

Affinché si verifichi una combustione è necessario che questi elementi raggiungano una temperatura opportuna detta **temperatura di innesco** o di accensione (ovvero è necessaria una fonte di energia ad alta temperatura che fornisca un certo valore di entalpia detta entalpia di attivazione).

Sostanza	Temperatura di accensione (ºC)
Benzina	250
Gasolio	220
Idrogeno	560
Pentano	420
Abete in trucioli	260
Carta da giornale in ritagli	230
Lenzuolo di cotone arrotolato	238
Fiammiferi	163
Gomma sintetica in pani	294 ÷ 310
Coperte di lana arrotolate	205
Pannelli di legno truciolare	216 ÷ 230
Film di nitrocellulosa	137
Nylon	476
Rayon - Viscosa	280
Seta naturale	570

Tabella 2.1 - Esempi di temperature d'accensione.

Le sostanze combustibili possono essere:

- Solide: (carbone, legno, carta, plastica, tessuti, pelli, gomme, etc.) in questo caso è importante conoscerne la pezzatura, la compattezza e l'umidità;
- Liquide: (petrolio, benzina, alcool, oli, etc.) tendono ad evaporare ed a bruciare come miscele di vapori ed ossigeno, per questo è importante conoscere la temperatura del liquido e la concentrazione del vapore nell'aria;
- Gassose: (metano, idrogeno, acetilene, etc.) la combustione può avvenire solo in un determinato campo di concentrazioni per cui è fondamentale conoscere la concentrazione del gas in ogni ambiente di riferimento.

I prodotti della combustione sono principalmente gas e vapori surriscaldati quali l'ossido

di carbonio, l'anidride carbonica, alcuni idrocarburi incombusti, ma anche particolato solido (più comunemente noto come fumo).

I combustibili liquidi sono classificati in base al punto (o temperatura) d'infiammabilità, ovvero in base alla più bassa temperatura alla quale il liquido libera vapori in quantità tale da incendiarsi in presenza di innesco.

I combustibili gassosi o in fase di vapore devono essere presenti in determinate proporzioni con l'ossigeno altrimenti la combustione non avviene. Queste concentrazioni vengono dette limite inferiore (la quantità di ossigeno è troppo scarsa per soddisfare le necessità ossidative del combustibile) e limite superiore di infiammabilità (le molecole di combustibile sono talmente poche che non riescono a liberare energia sufficiente affinché si crei una condizione di innesco a catena che permetta il propagarsi del fronte di fiamma).

Tipo di liquido	Categoria	Temperatura d'infiammabilità(ºC)
Liquidi molto infiammabili	A	< 21
Liquidi infiammabili	B	21 - 65
Liquidi combustibili (oli combustibili)	C	65 - 125
Oli lubrificanti	D	> 125

Tabella 2.2 - Classificazione dei combustibili e relative temperature d'infiammabilità.

La velocità di una combustione dipende dalla composizione chimica, dalla concentrazione e dallo stato fisico delle sostanze reagenti, ma anche dalla temperatura. Per cui, quando il calore che si sviluppa da un incendio non viene rapidamente dissipato, la velocità della reazione chimica continua ad aumentare per effetto dell'aumento della temperatura.

La classificazione degli incendi si fa in base al combustibile principalmente interessato:

- Classe A: incendio di combustibili solidi;
- Classe B: incendio di combustibili liquidi;
- Classe C: incendio di combustibili gassosi;
- Classe D: incendio di combustibili metallici (potassio, magnesio, alluminio, etc.).

Questa classificazione è necessaria per normalizzare le procedure ed i mezzi più idonei ad affrontare i diversi tipi di incendio.

In base alla velocità di combustione, le sostanze possono suddividersi in **incombustibili** (bassa velocità), **infiammabili** (media velocità) ed **esplosive** (alta velocità).

Le fonti di innesco per gli incendi in ambito civile possono essere costituite da: fiamme libere, fiammiferi e sigarette accese, cortocircuiti elettrici, archi e scintille elettriche, cavi elettrici, attrito, apparecchiature meccaniche ad elevata temperatura.

2.3 COMPOSIZIONE DI UNA FIAMMA

Una fiamma è un corpo, o un flusso di materiale gassoso coinvolto nel processo di combustione, che emette energia radiante ad una specifica lunghezza d'onda in funzione della chimica di combustione del combustibile.

In molti casi, una porzione dell'energia irradiata emessa è visibile all'occhio umano ed è ad essa che riferiamo la nostra primitiva concezione di "fuoco".

La fiamma consiste in una mistura di ossigeno (generalmente fornito dall'aria ambiente) ed un altro gas (tipicamente una sostanza combustibile come l'idrogeno, il monossido di carbonio o vari idrocarburi).

Le fiamme più brillanti non sempre sono le più calde. Per esempio, l'idrogeno, pur avendo una temperatura di fiamma molto alta, comunque esso si combini con l'ossigeno bruciando per formare acqua, ha una fiamma quasi invisibile in circostanze ordinarie.

Per meglio comprendere la composizione di una fiamma, l'esempio di una semplice candela può essere d'aiuto (Figura 2.1).

Quando la candela è accesa, il calore della fiamma squaglia la cera che vi si trova a contatto. Non appena i legami della cera solida sono rotti dal calore, la cera vaporizza e si combina con l'ossigeno dell'aria circostante producendo calore e luce nella forma di una fiamma che consiste fondamentalmente di tre zone facilmente distinguibili.

La più interna, la zona di non luminanza, è composta da una mistura di aria e gas ad una temperatura relativamente bassa. Nella seconda, la zona luminosa, l'idrogeno ed il monossido di carbonio (due dei tanti prodotti di decomposizione della cera) reagiscono con l'ossigeno per formare acqua, anidride carbonica ed altri prodotti. In questa zona, la temperatura della fiamma è di circa 590-680°C, che è una valore sufficientemente intenso per dissociare i gas di fiamma e produrre particelle di carbonio libere. Queste particelle sono

prima scaldate all'incandescenza, e poi consumate.

Fuori della zona luminosa vi è una terza, invisibile, zona in cui si esauriscono le rimanenti quantità di CO e H_2O. Questa zona non è visibile all'occhio umano.

Tutte le sostanze combustibili richiedono un ammontare finito di ossigeno per bruciare completamente (una fiamma può essere sostenuta in un'atmosfera di cloro puro, ma la combustione non può completarsi). Nell'incendio di una candela o di solidi come legno o carbone, l'atmosfera circostante provvede ad alimentare questo ossigeno.

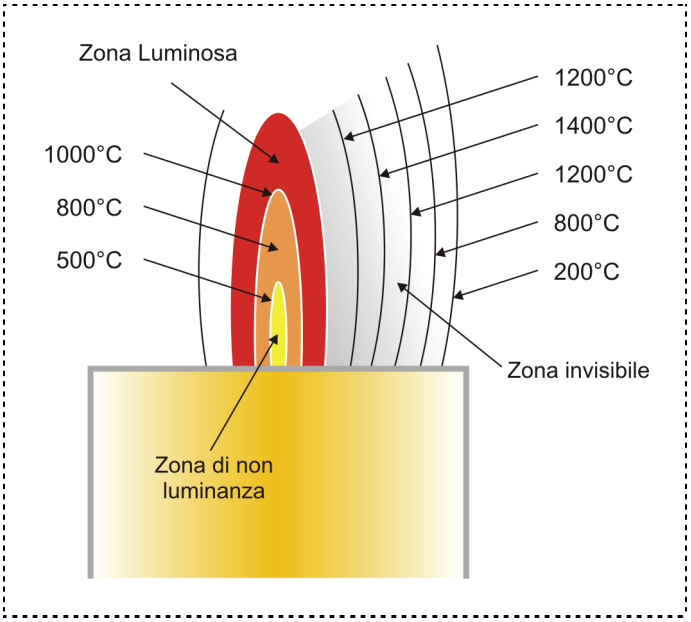

Figura 2.1 - Temperatura e sua distribuzione nelle fiamme di una candela.

Ogni qual volta si aumenta la percentuale di ossigeno (vento, flusso d'aria, atmosfera ossigeno-arricchita), le temperature tendono a valori più alti rispetto ad una combustione in atmosfera normale; ad esempio la porzione più calda delle fiamme di ossigeno-acetilene, usate per tagliare e saldare metalli, misura circa 3500°C perché sono presenti elevate quantità di ossigeno.

In bruciatori tipo caldaie, l'aria o l'ossigeno puro sono miscelati al combustibile secondo rapporti controllati, così che il gas è consumato quasi istantaneamente alla bocca del bruciatore e la quantità di calore prodotta è esattamente quella desiderata.

Quanto visto porta ad un'ulteriore classificazione delle fiamme in **fiamme di diffusione** "diffusion flame" e **fiamme premiscelate** "premixed flame". Le prime si formano dall'accoppiamento casuale di combustibile ed ossigeno che si incontrano provenendo da due lati opposti della zona di reazione. Nelle seconde, invece, l'ossigeno è mescolato con il gas combustibile da un'apparecchiatura meccanica secondo rapporti predefiniti, come nelle caldaie, nei bruciatori, nei motori a scoppio o nei fornelli domestici.

Gli incendi naturali producono fiamme di diffusione, in quanto nessun dispositivo mescola pianificatamente combustibile ed aria. Esempi comuni includono il rogo di un falò la fiamma di un fiammifero, un pool fire da idrocarburi o l'incendio di una foresta.

2.4 TEMPERATURA DI UNA FIAMMA

Il comportamento pulsante di una fiamma fà sì che la sua temperatura abbia valori fluttuanti. La temperatura varia infatti attraverso l'altezza della fiamma ed inoltre, ad una data posizione, essa fluttua intensamente. Valori maggiormente fluttuanti si hanno, in particolare, lungo il suo contorno e vicino la cima della fiamma. Quindi, ogni considerazione di temperatura è di solito relativa alla temperatura sull'asse o alla temperatura media ottenuta misurando i valori in tempi diversi ed in posizioni diverse all'interno della fiamma.

Relativamente al caso generale di una fiamma (non più al singolo caso di una candela) McCaffrey (1979) descrisse tre diverse regioni in funzione di tre diversi regimi di fiamma e di temperatura, distinguendo tra:

- una **regione di fiamma continua** che comincia leggermente al di sopra della base del fuoco, dove le temperature hanno una distribuzione continua e si stabilizzano su valori leggermente inferiori ai 900°C;
- una **regione di fiamma intermittente** che è al di sopra della regione di fiamma continua, dove le temperature variano in funzione dell'altezza del punto e le punte di fiamma visibili hanno una temperatura di circa 320°C;
- una **regione di penna termale** che è oltre le punte di fiamma, dove non vi sono fiamme visibili e la temperatura continua a decrescere in funzione degli incrementi di distanza dalla fiamma.

2.5 IL MECCANISMO DELLA COMBUSTIONE

La proprietà più importante di un combustibile, dal punto di vista della valutazione prestazionale della sicurezza antincendio, è il calore di combustione. Per studiare questa proprietà si deve considerare che i liquidi vaporizzano interamente quando bruciano e che per essi la sola forma di combustione possibile è quella con fiamma, che potrà essere o non essere visibile. Al contrario dei liquidi, la maggior parte dei solidi, quando bruciano, vaporizzano solo parzialmente e producono prodotti infiammabili noti anche come “prodotti di pirolisi”.

La fase di combustione con fiamma è quella che, dal punto di vista della sicurezza delle persone e dei danni ai beni, determina il rischio maggiore.

Uno dei fattori più importanti che influenzano questa fase è la facilità di produzione di vapori infiammabili. Questa predisposizione può essere misurata attraverso il calore richiesto per la loro produzione, e tale valore è uno dei valori più importanti per la valutazione del rischio incendio associato alle sostanze presenti in un ambiente.

Indipendentemente dalle caratteristiche del materiale, la combustione una volta avviata può seguire tre diverse strade:

1. può estinguersi da sola senza coinvolgere altri materiali;
2. può estinguersi da sola o continuare a bruciare molto lentamente, in caso di ventilazione inadeguata;
3. può proseguire fino al completo coinvolgimento dell’ambiente, con la conseguente combustione di tutte le superfici combustibili esposte, in caso di ventilazione sufficiente e di elevate quantità di combustibile presente.

2.5.1 L’innesco

Perché si verifichi l’innesco devono essere presenti nell’ambiente uno o più gas infiammabili (che possono essere anche prodotti di pirolisi) e deve essere disponibile una fonte di energia in grado di produrre l’innesco pilota o di determinare nella miscela un aumento di temperatura tale da indurre la combustione spontanea. La temperatura minima alla quale i vapori sono in grado di essere innescati è chiamata **flash point** (punto di infiammabilità).

Dal punto di vista dell'evoluzione della combustione si osserva che, sia nel caso dei liquidi che dei solidi, il fatto che un innesco avvii la combustione non implica che questa si autosostenga. La fiamma, infatti, deve essere in grado di trasmettere alla superficie della sostanza il calore sufficiente per alimentarla. La temperatura alla quale si manifesta questo meccanismo è chiamata **fire point** ed è solitamente di qualche grado superiore alla temperatura che produce l'innesco della miscela.

Una volta raggiunto il fire point, l'avvio della combustione dipenderà dalla presenza di una sorgente in grado di innescare i vapori prodotti. Se non sono presenti fiamme, lapilli o scintille la combustione avrà inizio quando la miscela dei vapori con l'aria avrà raggiunto la temperatura di autoaccensione, ossidandosi e bruciando spontaneamente. Anche in questo caso la temperatura dipende dal tipo di materiale coinvolto.

2.5.2 La propagazione degli effluenti dell'incendio

La propagazione degli effluenti dell'incendio è determinata soprattutto dalla spinta verso l'alto e dall'aumento di volume dei gas prodotti, più caldi rispetto all'ambiente circostante; il loro controllo può avvenire attraverso barriere, sistemi di estrazione o controflussi causati da differenziali di pressione.

La temperatura di un effluente dell'incendio determina la spinta di galleggiamento e dipende dalla potenza termica prodotta; per calcolarla è necessario valutare il contributo della quantità di aria che entra nel plume[2].

L'aria che è risucchiata nel plume (questo fenomeno è denominato **air entrainment**) riduce la concentrazione e la temperatura degli effluenti e migliora le caratteristiche ai fini della visibilità all'interno dell'ambiente in cui si propaga il fumo, anche se ne aumenta il volume complessivo.

I plumi possono essere caratterizzati in vari gruppi in funzione dello scenario che li determina. La categoria che si incontra prevalentemente nei problemi della Fire Safety Engineering è quella dei plumi la cui origine è riconducibile ad una fonte termica puntuale.

---

[2] Con il termine plume, dall'inglese "fire plume", si intende la colonna di fumo e di gas caldi, alla quale ci si può riferire anche con il termine di pennacchio, che si eleva dal focolaio e che ingloba nel suo moto ascensionale l'aria incombusta presente nell'ambiente.

Tali plumi detti anche “plumi assialsimmetrici galleggianti” come descritto da George, Alpert, e Tamanini (1977), ed Alpert & Ward (1984), si formano generalmente quando una fiamma di diffusione si sviluppa al di sopra di una ristretta area di combustibile. Si presume pertanto l’esistenza di una certa simmetria lungo la linea centrale verticale della penna.

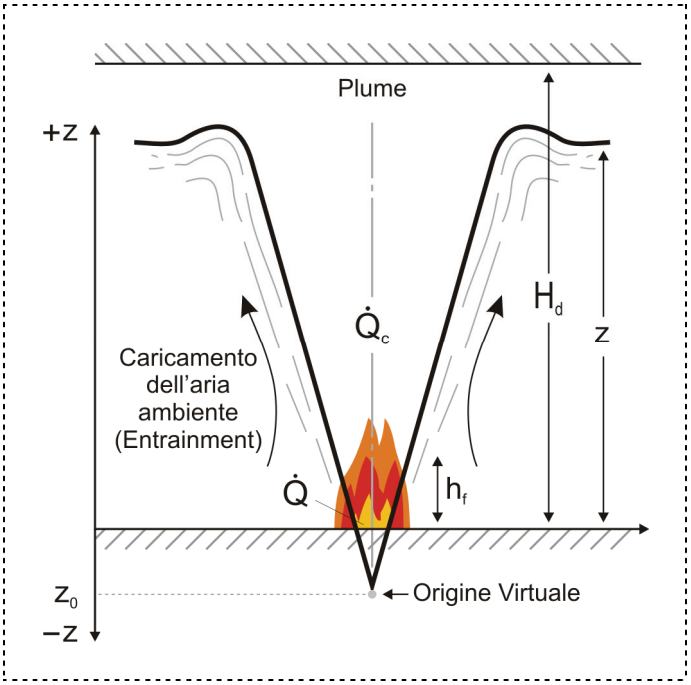

Figura 2.2 - Schematizzazione di un Plume Turbolento e del meccanismo di entrainment.

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = \frac{[\text{Energia}]}{[\text{Tempo}]} = [\text{Potenza}] \tag{2.1}$$

La Figura 2.2 mostra una colonna turbolenta di gas caldi che si innalzano a causa della differenza di galleggiabilità tra essi e l’aria circostante: l'effetto della turbolenza provoca il rapido mescolamento con l'aria. L'inglobamento di massa fredda nella colonna che si innalza ne decresce la velocità, ne allarga la sezione e ne riduce la temperatura.

Quando un fuoco continua a crescere in una zona superiormente delimitata, il plume generalmente urta contro il soffitto, a meno che il fuoco resti piccolo o il soffitto sia molto

alto. Un plume assialsimmetrico non confinato non ha barriere fisiche che ne limitino il movimento verticale o che restringano il flusso dell'aria al suo contorno. In uno spazio confinato un plume può invece essere influenzato dalle superfici che lo circondano.

Per esempio, la superficie attraverso la quale l'aria può entrare è notevolmente ridotta se un incendio avviene a ridosso di un muro. Analogamente, se il pennacchio urta contro un soffitto, il flusso sarà deflesso orizzontalmente e formerà ciò che si indica come **ceiling jet**[3].

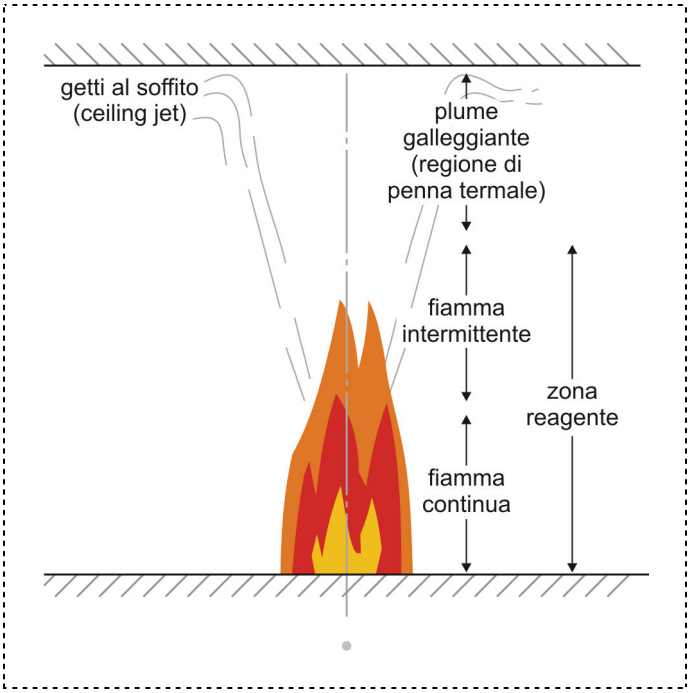

Figura 2.3 - Zone caratteristiche di un plume assialsimmetrico.

Il contatto con il soffitto riduce anche l'ammontare dell'aria caricata dal plume. La conseguenza più importante del confinamento di un fuoco è il trasferimento di calore da questo alle superfici che lo circondano e la velocità con la quale queste superfici (se combustibili) si accendono e contribuiscono al processo di crescita del fuoco stesso.

[3] Letteralmente “getti al soffitto”. In letteratura specialistica si usa per indicare il movimento dei fumi al di sotto di un soffitto in quanto esso è osservabile come una sequenza di getti turbolenti.

Se i muri sono molto lontani, la temperatura e la velocità dei getti al soffitto decadono a valori trascurabilmente bassi prima che i getti incontrino il muro più vicino. In ogni caso, se il muro più vicino non è molto lontano, si ha una riflessione dei getti quando questi incontrano il muro, ed i flussi riflessi si muovono indietro verso il fuoco al di sotto dei getti originari. Così lo strato caldo sotto il soffitto diviene più spesso.

Se il compartimento ha un'apertura e il fuoco continua nel tempo, lo strato caldo diviene spesso abbastanza per estendersi al di sotto della parte alta dell'apertura, anche dopo che i gas caldi cominciano ad uscire dal compartimento.

2.5.3 Il flashover

Il termine flashover è stato introdotto negli anni '60 dallo scienziato britannico P. H. Thomas ed è usato per descrivere la fase di crescita di un incendio nel punto in cui esso è pienamente sviluppato. Il verificarsi del flashover in un ambiente riveste una notevole importanza nelle valutazioni di sicurezza in caso di incendio in quanto, generalmente, esso costituisce il segnale ultimo delle condizioni di non sostenibilità dell'ambiente interessato.

Il fenomeno del flashover riveste particolare criticità negli ambienti fortemente confinati, laddove le aperture verso l'esterno realizzano, per i gas ed i fumi prodotti dalla combustione, tassi di smaltimento inferiori ai rispettivi tassi di produzione determinando un rapido deterioramento delle condizioni di sostenibilità.

Anche se in letteratura esistono differenze significative, le definizioni per la valutazione del flashover sono fondate su dati sperimentali: temperatura dei gas superiore a 600 °C o flusso termico a livello del pavimento pari a 20 kW/m^2.

Da un punto di vista formale il flashover può essere definito in due modi differenti che conducono, però, a risultati equivalenti:

1. **il flashover è l'accadimento di un evento critico in termini di bilancio termico**.
   I sistemi che comprendono un termine di generazione del calore sono suscettibili di condizioni critiche (runaway) se la velocità di generazione del calore, ad un certo punto, supera la capacità del sistema di disperdere calore dai confini.

2. **il flashover è un processo di riempimento fluido-meccanico**.
   In termini sperimentali è stato constatato che esso ha luogo durante un intervallo breve in cui l'ambiente si riempie rapidamente di gas caldi.

2.5.4 La componente radiante delle fiamme

Il trasferimento di calore per irraggiamento da parte della fiamma dipende da alcune sue specifiche caratteristiche quali l'emissività, la temperatura e le dimensioni.

L'irraggiamento determinato dalla fiamma è dovuto principalmente alla componente calda dei gas ed anche, nelle combustioni con fiamma visibile, alla concentrazione del particolato che, a sua volta, dipende dal tipo di materiale che brucia.

La relazione che lega le caratteristiche della fiamma alla componente radiante che la fiamma stessa emette è funzione del coefficiente di assorbimento α [m^{-1}], dello spessore della fiamma **L** [m] e della sua temperatura **T** [K] secondo la relazione:

$$\dot{q}_{rad} = \left(1 - e^{-\alpha L}\right)\sigma T^4 \qquad \left[kW/m^2\right] \tag{2.2}$$

dove σ [$5{,}67 \cdot 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}] è la costante di Stephan-Boltzman.

2.5.5 La componente convettiva delle fiamme

Il trasporto di calore per convezione è dovuto al contatto tra I prodotti della combustione e le pareti dell'ambiente che li confina. Pertanto, questo termine è governato fondamentalmente dalla velocità di spostamento dei gas e dalla loro temperatura.

Secondo Heskestad, il trasferimento di calore per convezione può essere espresso dalla relazione:

$$\dot{q}_{conv} = h\left(T - T_0\right) \qquad \left[kW/m^2\right] \tag{2.3}$$

dove **h** [W m^{-2} K^{-1}] è il coefficiente di trasmissione del calore, **T** [K] è la temperatura della fiamma o del plume nel punto di contatto con la superficie e $\mathbf{T_0}$ [K] è la temperatura iniziale della superficie.

2.6 LE CURVE DI RILASCIO TERMICO

Studi sull'andamento della temperatura media in un ambiente confinato, durante il tempo di evoluzione di un incendio, hanno reso possibile l'individuazione di quattro distinte fasi del

fenomeno. Con riferimento alla Figura 2.4, nel primo tratto AB, rappresentativo della fase di accensione, il calore liberato da una sorgente (es. un fiammifero acceso) viene intercettato da una parte del combustibile che aumenta la propria temperatura fino a raggiungere la soglia di innesco; oltre questo valore il combustibile inizia a reagire con l'ossigeno, liberando altra energia e auto sostentando il processo di combustione stesso (autocatalisi).

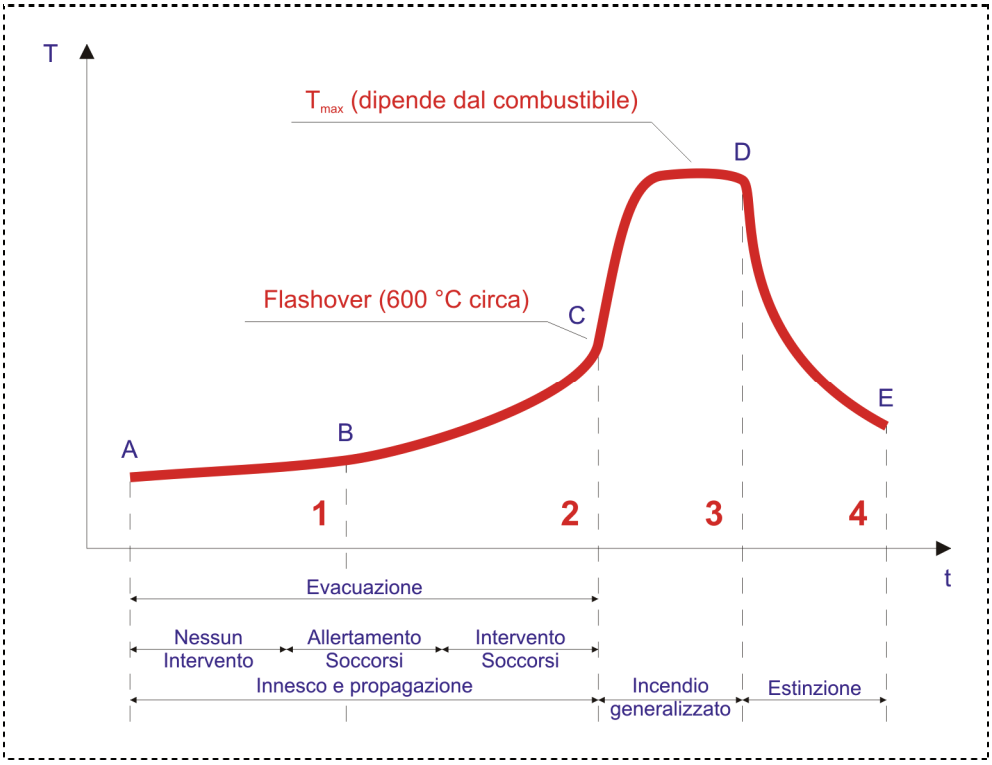

Figura 2.4 - Evoluzione della Temperatura nel tempo di un incendio tipico.

In questa fase, non tutto il combustibile prende parte alla reazione per cui la temperatura cresce lentamente col tempo (relazione pressoché lineare) e la durata di questo transitorio dipende dall'infiammabilità, dalla granulometria e dalla velocità di decomposizione del combustibile, ma anche dalla possibilità di propagazione della fiamma, dalla ventilazione, dalla geometria e dal volume dell'ambiente.

Se il combustibile è lontano da altri materiali infiammabili l'incendio si esaurisce senza propagarsi ulteriormente. Se, invece, le fiamme raggiungono altro materiale e portano la

temperatura al di sopra della soglia di infiammabilità l'incendio si propaga, la temperatura s'innalza (tratto BC) e si avvicina al punto di Flashover (C).

Nel tratto BC la temperatura sale esponenzialmente fino a 500-600°C in un tempo variabile tra i 5 e i 25 minuti in funzione del tipo di combustibile. Si ha un'abbondante produzione di gas di distillazione i quali, combinandosi con l'aria presente, formano una miscela infiammabile. Contemporaneamente si producono fumi di gas tossici e nocivi che riducono la visibilità ed aumentano la velocità di combustione. Da questo punto in poi se l'incendio non è stato circoscritto si espande molto rapidamente grazie alle specie gassose prodotte e diviene incontrollabile (Flashover sta appunto per "non ritorno").

In questa fase avanzata dell'incendio diventa importantissima la concentrazione di ossigeno; infatti esso viene ridotto ad una velocità elevata e se manca un adeguato rinnovo d'aria il fuoco si "strozza" in attesa di una nuova quantità di ossigeno. A garantire il rinnovo d'aria concorrono i seguenti fattori: termo espansione dell'aria, effetto camino, azione del vento naturale o azione della ventilazione forzata (es. estrazione fumi).

Alla temperatura di Flashover (punto C) avviene la rottura delle superfici vetrate, la ventilazione è più vigorosa e l'ossigenazione permette di spingere la temperatura in brevissimo tempo ai valori massimi (che dipendono comunque dal tipo combustibile).

Nel tratto CD la propagazione delle fiamme è estesa a tutto il materiale combustibile presente con conseguente emissione massima di energia termica, la temperatura può raggiungere valori tali da produrre danni alla struttura portante. La temperatura massima raggiungibile dipende dalla quantità e dal tipo di materiale presente nel locale.

Infine, nel tratto DE, si è in presenza della fase di estinzione nella quale il materiale combustibile comincia ad esaurirsi e la temperatura smette di crescere per cominciare a diminuire.

2.6.1 Il tasso del rilascio termico: la grandezza HRR

Una combustione rilascia nell'ambiente quantità di calore per irraggiamento e per convezione. Ai fini della previsione dell'evoluzione di un incendio in un ambiente il dato di maggiore interesse è quello della potenza termica rilasciata dal materiale o dal set di materiali che alimenta la combustione.

L'insieme dei dati che per un dato materiale o prodotto definiscono il rilascio di calore nel

tempo è riassumibile nelle curve di rilascio termico. L'informazione fondamentale che forniscono queste curve è quella del **tasso del rilascio termico**, definito nella letteratura anglosassone come **Heat Release Rate**. Il termine "rate", rateo o tasso, indica infatti la misura dell'energia termica rilasciata nell'unità di tempo [Potenza] e si riferisce ad una combustione in eccesso d'aria.

Nelle curve HRR si trova sempre una fase di crescita ed una di decadimento, oltre ad un tratto superiore a potenza costante, corrispondente all'incendio pienamente sviluppato. In alcuni casi, alla crescita segue un picco e poi il decadimento.

A volte si può incontrare nella fase di avvio uno stadio di combustione latente o covante, che rappresenta la fase di incubazione dell'incendio. Questa fase, nella letteratura anglosassone, è individuata con il termine "smouldering".

Alle curve di rilascio termico può essere associata l'individuazione delle condizioni che corrispondono al flashover, indicato dalla presenza del tratto orizzontale, nel quale tutto il materiale presente nell'ambiente sta bruciando.

2.6.2 Fuochi stazionari e non stazionari

E' bene ricordare che il modello più corretto da utilizzare per lo studio di un incendio è quello che ne descrive l'andamento seguendo le reazioni chimiche tra combustibile e comburente (modello cinetico reattivo). Esso è il solo in grado di ricrearne l'andamento reale quando le condizioni di ossigenazione variano nel tempo.

Il modello cinetico reattivo fornisce l'HRR corretto, ma per essere utilizzato necessita di una notevole quantità di parametri (stechiometria delle reazioni, potere calorifico delle specie interessate, parametri termici, caratteristiche fisiche, costanti di equilibrio se la specie è presente in più fasi, caratteristiche e comportamento dei prodotti della combustione, condizioni di aerazione, etc.), per cui spesso si abbandona questo approccio per modelli semplificati più facilmente gestibili.

In alternativa, nei modelli semplificati, si preferisce utilizzare un valore dell'HRR teorico svincolato dalla stechiometria e dalla cinetica delle reazioni. La scelta del valore opportuno di HRR deve essere condotta in base ad opportune considerazioni sull'ambiente e sullo scenario complessivo dell'evento incidentale, con particolare riferimento alla ventilazione presente.

Si intendono fuochi stazionari quelli in cui l'ossigenazione è sempre stechiometrica e la superficie occupata dal fuoco è pressoché costante, per cui l'HRR può essere assunto costante nel tempo. Da notare che in realtà queste ipotesi sono soddisfatte solo in particolari condizioni di ventilazione ed in assenza di diffusioni di combustibile in tutto l'ambiente.

Nel caso di ambienti comuni, in assenza di altre informazioni riguardo alla destinazione d'uso, possono essere di riferimento i valori in Tabella 2.3.

Definizione	Potenza Q (kW)	Superficie S (m²)	Flusso areico q (kW/m²)
Fuoco piccolo in ambiente senza combustibile	2100	9,3	225
Fuoco piccolo in ambiente con combustibile	4650	9,3	500
Fuoco grande in ambiente con combustibile	25000	50	500

Tabella 2.3 - Potenza e superficie di fuochi stazionari ottenuti mediando il flusso areico dai più comuni materiali presenti in un locale per uso civile.

I fuochi di piccola estensione occupano mediamente un'area minore o uguale a 9 m² e possono dare origine a potenze comprese tra 2100 e 4700 kW a seconda del tipo di materiale presente.

Per fuochi non stazionari costantemente e sufficientemente ossigenati, in grado di espandersi fino a coinvolgere tutto il materiale infiammabile, l'HRR è funzione del tempo e per esso vengono scelte formulazioni matematiche più o meno complesse.

Raggiunta la potenza termica massima si fà l'ipotesi che l'HRR resti costante fino all'esaurimento del combustibile (anche se per problemi di ossigenazione si avrebbe un effetto pulsante intorno ad un valore medio). Tra le possibili formulazioni riportiamo le più utilizzate (Figura 2.5):

1. funzione lineare a tratti: permette una migliore approssimazione quando è noto l'andamento dell'HRR reale. In questo caso l'effetto dell'ossigenazione è noto.
2. funzione quadratica: la quantità di calore liberato cresce con accelerazione costante. In questo caso non si è mai in deficit di ossigeno.
3. funzione tangente iperbolica: è più adatta in condizioni di ossigenazione non

completamente libera, infatti, con un andamento crescente ma smorzato evidenzia, al crescere della potenza liberata (e quindi all'aumentare della quantità di combustibile ossidato) l'effetto sempre più rilevante che la concentrazione di ossigeno ha sulle cinetiche di reazione.

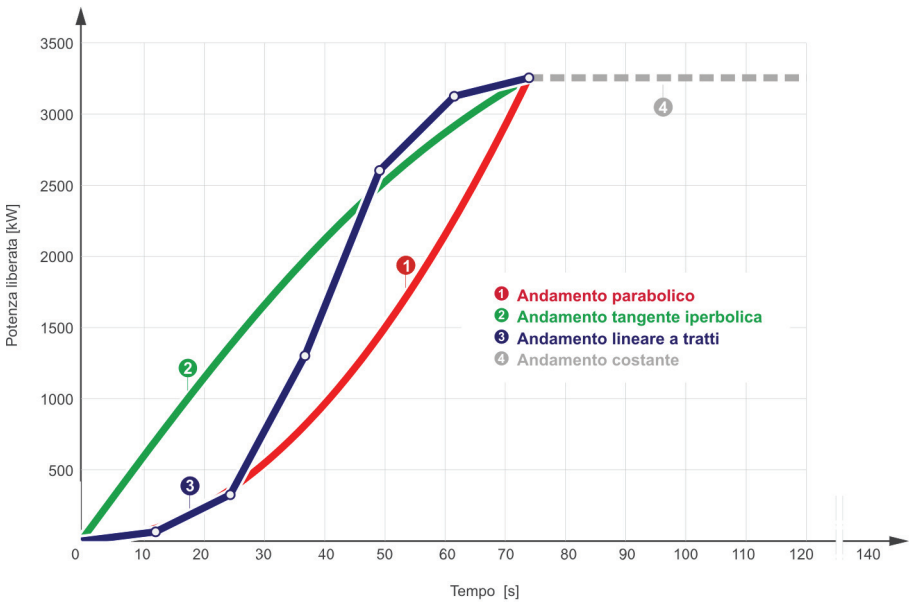

Figura 2.5 - Schematizzazioni analitiche del processo di crescita di un fuoco.

Volendo approfondire il caso della funzione quadratica, caso **t-squared**, la relazione che lega quantità di calore al tempo è del tipo

$$\dot{Q} = \alpha \cdot (t - t_0)^2 \qquad (2.4)$$

dove viene indicato con α [kW/s^2] la costante di crescita e con $\mathbf{t_0}$ [s] il tempo di effettiva accensione, essendo $\dot{Q}$ l'HRR totale [kW].

Spesso si adotta la formula semplificata ricavata per $t_0 = 0$, che indica un'immediata accensione del materiale infiammabile, ma in realtà una volta raggiunta la temperatura di accensione trascorre sempre un certo lasso di tempo prima che sul materiale si istauri un

processo di combustione autosostentato.

Può inoltre definirsi il tempo di crescita convenzionale del fuoco t_{cs} , come l'intervallo di tempo necessario per raggiungere con legge quadratica la potenza liberata di 1055 kW (1000 btu/s). Con questo parametro è quindi possibile effettuare una classificazione dei fuochi non stazionari in base alla loro velocità di crescita.

T-squared fires	Costante di crescita α (kW/s²)	Tempo di crescita specifico t_{cs} [s]
Lento	0,00293	600
Medio	0,01172	300
Veloce	0,04690	150
Ultra-veloce	0,18760	75

Tabella 2.4 - Classificazione fuochi t-squared.

2.7 CORRELAZIONI PER IL CALCOLO DELLA TEMPERATURA

Abbiamo visto che con il termine plume si intende "la colonna di fumo galleggiante formata da prodotti di combustione caldi, da combustibile in via di combustione, vapore ed aria". In letteratura sono disponibili numerose correlazioni per valutare la temperatura centrale di un plume, e quasi tutte restituiscono la temperatura come una funzione dell'HRR (totale o puramente convettivo), dell'altezza considerata e del diametro fittizio della sorgente di combustibile.

Ad ogni relazione corrisponde un preciso set di esperienze, più o meno vaste, e non esiste una relazione che possa essere considerata di riferimento per ogni situazione. E' dunque opportuno entrare nel merito della teoria di ognuna di esse prima di potere trarre considerazioni di qualsiasi tipo.

Tra gli elementi che caratterizzano la propagazione dei prodotti della combustione si devono considerare anche le caratteristiche geometriche dell'ambiente. In un volume di grande altezza, ad esempio, il progressivo inglobamento d'aria nel plume può abbassarne la temperatura fino a non consentire al fumo di raggiungere il soffitto.

Un'altro importante elemento che deve essere valutato nel calcolo della temperatura dei

fumi riguarda la frazione di energia termica assorbita dai fumi stessi rispetto a quella rilasciata per irraggiamento. Nella sua valutazione si accetta normalmente che la componente convettiva arrivi a circa il 70% e quella radiante a circa il 30% del totale.

Per disporre di algoritmi e formule finalizzati al calcolo degli effluenti si deve, in primo luogo, risolvere il problema della formalizzazione dei meccanismi che determinano il moto dei fumi. Si è già visto, relativamente al caso dei plumi, che una delle semplificazioni più importanti è quella di schematizzare il focolare come un punto posto a quota inferiore rispetto alla quota effettiva del materiale che brucia (Figura 2.2).

2.7.1 La correlazione di Heskestad

Relativamente al caso di ambienti confinati, Heskestad [44] ha fornito una correlazione per il calcolo della temperatura sull'asse centrale di un plume, $\mathbf{T_{cp}}$, nell'ipotesi che il fuoco sia originato da una sorgente puntuale, equazione (2.5), come una funzione dell'altezza del soffitto, dell'HRR, del diametro fisico del fuoco e delle grandezze fisiche dell'ambiente di sviluppo della combustione. La formula, che si ritrova come punto di partenza di molte esperienze elaborate successivamente, è la seguente:

$$T_{cp} = 9{,}1 \cdot \left(\frac{T_a}{g \cdot c_p^2 \cdot \rho_a^2} \right)^{1/3} \cdot \dot{Q}_c^{\,2/3} \cdot \left(z - z_0 \right)^{-5/3} + T_a \qquad (2.5)$$

dove $\mathbf{g}$ [9,806 m/s] è l'accelerazione di gravità, $\mathbf{T_a}$ [20°C = 293,16 K] è la temperatura dell'ambiente, $\mathbf{c_p}$ [1,009 $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$] è il calore specifico a pressione costante dell'aria, $\boldsymbol{\rho_a}$ è la densità dell'aria a 20°C [1,225 Kg/m^3], $\dot{Q}_c$ [kW] è la frazione puramente convettiva dell'HRR totale, $\mathbf{z}$ [m] è la quota a cui si vuole calcolare la temperatura e $\mathbf{z_0}$ è la quota dell'origine virtuale del fuoco.

La stessa formula può riscriversi introducendo i dati relativi all'ambiente aria per la temperatura di 20°C:

$$T_{cp} = 24{,}5 \cdot \dot{Q}^{2/3} \cdot \left(z - z_0 \right)^{-5/3} + 20 \qquad (2.6)$$

L'origine virtuale $\mathbf{z_0}$ è l'altezza equivalente di una fonte di fuoco puntuale per il fuoco di area finita (Figura 2.2):

$$z_0 = 0{,}083 \cdot \dot{Q}^{2/5} - 1{,}02 \cdot D \tag{2.7}$$

dove **D** [m] è il diametro fisico del fuoco eventualmente ricavabile come diametro del cerchio equivalente alla proiezione orizzontale della data area incendiata.

E' bene evidenziare che, nelle formule precedenti, due differenti valori di HRR sono presenti:

- L'HRR totale, $\dot{Q}$, per il calcolo dell'origine virtuale del plume;
- L'HRR convettivo, $\dot{Q}_c$ per il calcolo della temperatura centrale del plume.

Soltanto la frazione convettiva è considerata responsabile del galleggiamento e del movimento dei fumi secondo Heskestad. La frazione complementare di perdita di energia dovuta alla radiazione è tipicamente dell'ordine del 20% ÷ 40%. Frazioni maggiori di perdita radiativa si hanno con fuochi più fuligginosi e fiamme più luminose, originati spesso da combustibili che bruciano con bassa efficienza di combustione.

L'HRR convettivo è dunque spesso compreso tra il 60% ÷ 80% dell'HRR totale. Vedremo più avanti che l'algoritmo interno del software di simulazione FDS[4] utilizza, per compensare le approssimazioni dovute a certe modalità di calcolo, un valore di frazione radiativa costante e pari al 35%.

Uno dei limiti di validità della formula di Heskestad si ha quando la distribuzione dei fumi tende alla formazione di uno strato caldo superiore (hot upper smoke layer), che divenendo sempre più spesso, crea una discontinuità di concentrazioni e temperature. In questi casi, l'aria si trova ad una temperatura elevata e la differenza di temperatura tra il pennacchio e l'ambiente circostante diventa minima: il plume raffredda meno efficacemente e l'equazione (2.5) esegue una sottostima della temperatura.

In situazioni compartimentate tipiche, con ventilazione limitata, modelli basati su queste correlazioni possono produrre risultati inaccettabili.

---

[4] Fire Dynamics Simulator del NIST (National Institute of Standards and Technology).

2.7.2 Stima della Temperatura dei ceiling jet

In un ambiente confinato, quando la temperatura del plume è molto elevata, i prodotti della combustione raggiungono il soffitto ed hanno inizio i “getti a soffitto”, che possono presentare una temperatura anche notevolmente superiore a quella dello strato superiore che si formerà successivamente.

Uno dei primi modelli sviluppati per il calcolo delle caratteristiche di un "ceiling jet" fu introdotto da Alpert [47]. Questo modello fu costruito osservando il flusso prodotto da fuochi stazionari al di sotto di soffitti infinitamente estesi, laddove cioè i getti non subiscono l’influenza di superfici di confinamento verticale. Una seconda correlazione presente in letteratura è stata sviluppata da Heskestad & Delichatsios [56].

Entrambe queste correlazioni, insieme alla correlazione di Heskestad del paragrafo precedente, cadono in difetto in situazioni compartimentate che portano alla formazione di uno smoke layer superiore.

Una terza correlazione è stata fornita da Alpert & Ward [54], questa volta studiando anche l’effetto del confinamento verticale, e dunque capace di valutare la temperatura anche nel caso in cui si formi uno strato caldo (hot layer) superiore.

E’ bene evidenziare che nessuna di queste tre correlazioni è stata sviluppata osservando esperienze in galleria, laddove il campo di moto dei fumi, insieme a quello del calore, è notevolmente condizionato dalla geometria stretta e lunga dell’ambiente, per cui i getti risultano confinati in senso trasversale e non confinati in senso longitudinale.

Inoltre, per lo stesso motivo, esse non tengono in conto l’effetto “forno” che si ha nella parte alta di gallerie con sezione a ferro di cavallo, laddove la forma concava della sezione associata alla bassa conducibilità termica dei materiali che la costituiscono, tende a far aumentare la temperatura dei fumi.

2.7.3 La correlazione di Alpert

Alpert ha derivato una correlazione per la temperatura massima di un “ceiling jet” basata su esperimenti con HRR variabile tra 668 kW e 98 MW [46,47] in ambienti di altezza compresa tra 4,6 m e 15,5 m.

La correlazione di Alpert è utile sia per il calcolo della temperatura dei getti al di sopra delle fiamme, che per il calcolo della temperatura dei getti a distanza dal fuoco, essendo

funzione oltreché dell'HRR totale $\dot{Q}$ [kW], e dell'altezza del soffitto, H_d [m], anche della posizione radiale, **r** [m]:

$$\frac{r}{H_d} \le 0{,}18 \qquad \Rightarrow \qquad T_{jet} = \frac{16{,}9 \cdot \dot{Q}^{2/3}}{H_d^{5/3}} + T_a \tag{2.8}$$

$$\frac{r}{H_d} > 0{,}18 \qquad \Rightarrow \qquad T_{jet} = \frac{5{,}38 \cdot \left(\dot{Q}/r\right)^{2/3}}{H_d} + T_a \tag{2.9}$$

dove T_a [20°C = 293,16 K] è la temperatura dell'ambiente.

2.7.4 La correlazione di Heskestad & Delichatsiosis

Heskestad & Delichatsios [56] condussero uno studio sperimentale e completo sulla configurazione dell'ambiente al di sotto di un soffitto interessato da un fuoco e sulla risposta a questo ambiente di vari tipi di rilevatori.

Essi trovarono che le distribuzioni di temperatura e di velocità nell'intorno di un soffitto piano e non confinato sono ben previste da correlazioni semplici, in funzione del tempo e dell'altezza del soffitto.

$$T_{jet} = \frac{T_a \cdot \left(Q^*\right)^{2/3}}{\left(0{,}188 + 0{,}313 \cdot r/H_d\right)^{4/3}} + T_a \tag{2.10}$$

$$Q^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot g^{1/2} \cdot H_d^{5/2}} \tag{2.11}$$

dove **r** [m] è la distanza radiale dall'asse del plume, **Q** [kW] è l'HRR del fuoco, **Q*** è l'HRR adimensionale, T_{jet} [°C] è la temperatura dei getti al soffitto a distanza **r** [m], H_d [m] è la quota del soffitto rispetto alla superficie del focolaio, **g** [9,806 m/s] è l'accelerazione di gravità, T_a [20°C = 293,16 K] è la temperatura dell'ambiente, c_p [1,009 $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$] è il calore specifico a pressione costante dell'aria, ρ_a è la densità dell'aria a 20°C [1,225 Kg/m^3].

2.7.5 La correlazione di Alpert & Ward

Alpert & Ward [54] hanno proposto una formulazione per il calcolo conservativo della temperatura dei “ceiling jet”, nel campo distante dal centro del plume almeno 0,2 volte l’altezza del plume stesso.

$$T_{jet} = \frac{6{,}81 \cdot \left(k \cdot \dot{Q}/r\right)^{2/3}}{H_d} + T_a \qquad \Rightarrow \qquad H_d > 0{,}108 \cdot \dot{Q}^{2/5} \tag{2.12}$$

dove **r** [m] è la distanza radiale del punto considerato dall’asse del plume, **k** è un parametro che può assumere il valore 1-2-4 a seconda che il fuoco sia lontano o vicino ad un muro oppure sia in un angolo, $\mathbf{T_{jet}}$ [°C] è la temperatura del plume, $\dot{\mathbf{Q}}$ [kW] è l’HRR del fuoco, $\mathbf{H_d}$ [m] è la quota del soffitto rispetto alla superficie che brucia e $\mathbf{T_a}$ [K] è la temperatura dell’ambiente.

2.8 LA PRODUZIONE DI FUMO

La quantità di fumo prodotta da una combustione dipende da alcuni fattori, ormai chiaramente individuati dalla ricerca.

In primo luogo, il fumo prodotto dalla combustione di un determinato materiale è legato al fattore di emissione, definito come la massa di fumo generato per unità di massa di combustibile bruciato. A seconda dei materiali, i valori variano da decimi di punto al venti per cento della massa. Sono le sostanze composte da idrocarburi aromatici a produrre più fumo, mentre i composti a base di carbonio semplici si trovano all’inizio di questa scala.

Come avviene per altri valori utilizzati nell'approccio ingegneristico, le modalità di determinazione delle grandezze fisiche giocano un ruolo importante.

I metodi utilizzati per determinare il fattore di emissione sono il metodo di flusso ed il metodo del bilancio di carbonio. Il primo sfrutta la misura della massa di fumo raccolta in un filtro, la misura della massa persa dal combustibile ed il rapporto tra il flusso di aria uscente rispetto a quello che attraversa il filtro. Nel secondo metodo, invece, si determina la massa di carbonio presente nell'aerosol come frazione della massa di carbonio presente in tutti i prodotti della combustione.

Per quanto riguarda il fattore di emissione, si nota nella Tabella 2.5 la forte dipendenza di questo parametro dal tipo di materiale: le sostanze che contengono ossigeno presentano i valori più bassi (ad esempio, gli alcoli), mentre quelli a struttura aromatica si pongono all'estremità opposta.

SOSTANZA	FATTORE DI EMISSIONE (SOOT_YIELD)
Alcol etilico	0,008
Etano	0,010 ÷ 0,243
Propano	0,037
Eptano	0,095
Propilene	0,096
Acetilene	0,177
Stirene	0,178
Toluene	0,178
Teflon	0,003
Legno (quercia rossa)	0,015
Polimetilmetacrilato	0,022
Polipropilene	0,060
Polietilene	0,075
Nylon	0,089 ÷ 0,091
Poliestere	0,112
Policarbonato	0,104 ÷ 0,130
Poliuretano rigido	0,104 ÷ 0,227
Poliuretano flessibile	0,131 ÷ 0,227
Polistirene	0,164
PVC	0,172

Tabella 2.5 - Valori del fattore di emissione per alcune sostanze. Tratto da “Generation and Transport of smoke components”, K. M. Butler, Fire Technology, 40, 149-176, 2004.

Un’ulteriore dipendenza, anche se meno rilevante, è quella della quantità di fumo dalla dimensione del focolaio (all'aumentare della dimensione del focolaio aumenta la quantità di fumo prodotta). Inoltre, in caso di flusso di aria non sufficiente aumenta in misura notevole la quantità di particolato generato.

Tra l'altro, in quest'ultimo caso aumenta notevolmente anche la tossicità degli aerosol rispetto a quelli generati dalla combustione dello stesso materiale in condizioni di ventilazione ideali.

Il fumo, ordinariamente, è notevolmente minore della massa d'aria risucchiata dal plume nella sua ascesa verso l'alto.

Dopo le prime fasi della combustione, il plume inizia a trasportare la massa di aria inglobata verso l'alto. Si forma, quindi, uno strato di prodotti della combustione al quale di solito ci si riferisce come fumo, ma che consiste in realtà di una miscela di aria, gas e altri prodotti della combustione di cui il particolato è solo un componente.

Con il passare del tempo, normalmente, questo strato diventa più spesso e più caldo. La dimensione della massa di prodotti della combustione e di aria che lo costituisce dipende essenzialmente dalla quantità di aria che entra nel plume.

Il calcolo di queste grandezze è complesso, e le relazioni che permettono di rappresentarne l'evoluzione dipendono da parametri diversi, di cui non è possibile dare conto in questa sede in modo adeguato.

2.8.1 Il movimento dei fumi

La maggior parte degli eventi mortali, avvenuti all'interno di strutture confinate, a causa di un incendio è legata alla difficoltà delle persone di raggiungere un luogo sicuro prima che le condizioni dell'ambiente divengano insostenibili. È noto a tutti, infatti, che la principale causa di non sostenibilità delle condizioni di un ambiente è il fumo.

Per questo motivo, la comprensione dei meccanismi che governano il movimento del fumo durante un incendio sono fondamentali nell'analisi prestazionale.

Si è già visto che per fumo si intende la sospensione di particelle in aria, contaminata da prodotti della combustione presenti sotto forma di gas spesso anche molto tossici.

Nel moto naturale del fumo viene inglobata altra aria che diminuisce la concentrazione degli effluenti abbassandone peraltro la temperatura.

Nelle prime fasi di un incendio confinato si formerà del fumo al di sotto del soffitto. Questo strato andrà via via crescendo, ad una velocità dipendente dalla velocità di combustione nonché dalle caratteristiche geometriche dell'ambiente. Con l'abbassarsi

dell'interfaccia dello strato di fumo diminuirà la massa di fumo entrante in quanto diminuirà l'altezza del plume.

Riepilogando, dunque, come tutti i fluidi, il fumo si muove sotto l'influsso di forze che si manifestano come gradienti di pressione all'interno della propria massa. Con particolare riferimento al fluido "fumo", tali forze sono determinate da:

- galleggiamento generato direttamente dal fuoco;
- galleggiamento generato dalla differenza di temperatura tra ambienti limitrofi;
- effetti del vento esterno o del naturale movimento dell'aria;
- sistemi meccanici di estrazione dell'aria.

2.9 COMPOSIZIONE DEI GAS COMBUSTI E PERICOLOSITÀ

I gas di combustione hanno una composizione varia, dipendente principalmente dal materiale combustibile incendiato, ma anche dalle temperature raggiunte durante il processo.

Durante le prime fasi di un incendio il materiale combustibile è interessato da un surriscaldamento che ne aumenta la temperatura verso la temperatura di innesco; in questa fase si registra il rilascio di notevoli quantità di composti organici volatili di varia natura parzialmente ossidati.

Specie componenti dei gas combusti	
ossido di carbonio CO	acido cianidrico HCN
anidride carbonica CO_2	acido cloridrico HCl
idrogeno solforato H_2S	perossido di azoto NO_2
anidride solforosa SO_2	aldeide acrilica CH_2CHCHO
ammoniaca NH_3	fosgene $COCl_2$

Tabella 2.6 - Specie componenti dei gas combusti.

Successivamente, con l'aumento della temperatura, la combustione diviene autosostentata ed i composti sono quasi completamente ossidati; ciò nonostante qualora l'ossigenazione non sia sufficiente, i gas esausti si arricchiscono di maggiori frazioni di composti non completamente ossidati come per esempio il monossido di carbonio.

Le concentrazioni di questi gas e le reazioni dell'organismo alla loro esposizione sono alla base della progettazione degli impianti di aerazione antincendio. Lo scopo di tali impianti è quello di garantire, in caso di incendio, concentrazioni di inquinanti tali che un'esposizione per un tempo pari al tempo di evacuazione del locale non rechi danno alle persone.

L'allontanamento dei fumi caldi dai locali incendiati abbassa la temperatura media dell'ambiente: temperature superiori a 60 ºC sono pericolose se l'umidità (vapore acqueo) è elevata; temperature pari 120 ºC sono sempre letali per un essere umano.

2.9.1 Ossido di carbonio - CO

È il composto più pericoloso perché si forma in grandi quantità, specialmente in condizioni di scarsa ossigenazione. È un gas incolore, inodore e non irritante. La sua azione tossica riguarda l'emoglobina contenuta nel sangue, con la quale è in grado di formare un composto stabile che impedisce il meccanismo di trasporto dell'ossigeno da parte del sangue, provocando l'asfissia dell'organismo.

Concentrazione di CO	Tempo max di esposizione
0,05 %	Fatale dopo tre ore
0,15 %	Fatale dopo un'ora
1,30 %	Incoscienza e morte in pochi minuti

Tabella 2.7 - Tempi di esposizione massimi sopportati dall'uomo per la concentrazione di CO.

2.9.2 Anidride carbonica - CO_2

Questo composto non è tossico per l'organismo ma, sostituendosi all'ossigeno nella composizione dell'aria, ha un effetto asfissiante quando raggiunge il 5% in volume.

Induce, inoltre, un'accelerazione del ritmo respiratorio, provocandone un aumento del 50% rispetto alle normali condizioni già per concentrazioni del 2%, e addirittura un aumento del 100% per concentrazioni del 3%.

2.9.3 Acido cianidrico - HCN

È un composto molto tossico che è in grado di agire in diversi modi. Le cellule colpite

dall'HCN o dai suoi prodotti muoiono per asfissia. Il composto si produce in modesta quantità in incendi ordinari quando la combustione interessa lana, seta resine acriliche, uretaniche e poliammidiche, specialmente in carenza di ossigeno. Ha l'odore classico di mandorla amara. Concentrazioni superiori allo 0,3% sono mortali.

2.9.4 Fosgene - $COCl_2$

Il fosgene si origina dalla combustione di sostanze contenenti cloro, come molte plastiche, ed è molto tossico e pericoloso in ambienti chiusi; inoltre, a contatto con acqua o in ambienti umidi, dà origine a soluzioni di HCl estremamente acide. Esse irritano e danneggiano le vie respiratorie e gli occhi, provocando vomito e costrizione toracica. In concentrazioni dello 0,003% è letale in trenta minuti, già in concentrazioni dello 0,005% è mortale in tempi molto brevi.

2.9.5 Idrogeno solforato - H_2S

Facilmente identificabile dal classico odore di uova marce, è un gas tossico che in concentrazioni modeste (0,05%) provoca vertigini e vomito dopo mezz'ora, ma a concentrazioni elevate (maggiori di 0,05%) reca danni al sistema nervoso tendendo al blocco della respirazione.

2.9.6 Ammoniaca - NH_3

Si forma dalla combustione di materiali contenenti azoto. Essendo utilizzata in alcuni impianti di refrigerazione, l'ammoniaca costituisce la sostanza di maggior rischio in caso di fughe o esplosioni.

La sua intossicazione provoca lo spasmo della glottide ed il successivo soffocamento in mezz'ora, già a concentrazioni dello 0,5% .

2.9.7 Acido cloridrico - HCl

Si forma come il fosgene dalla combustione di materiali contenenti cloro, come le plastiche, ha un'azione molto caustica, ed in concentrazioni superiori allo 0,01% è fatale in pochi minuti.

2.9.8 Aldeide acrilica - CH_2CHCHO

Si forma dalla combustione di materiali derivati dal petrolio, grassi e oli.

È estremamente tossica: già ad una concentrazione di 10 ppm (0,001%) è letale. L'aldeide acrilica o acroleina è tossica per il fegato e irritante per la mucosa gastrica. Viene prodotta dalla disidratazione del glicerolo, reazione che si presenta anche durante la comune frittura oltre il punto di fumo dell'olio utilizzato.

2.9.9 Anidride solforosa - SO_2

Si produce durante la combustione di materiale contenente zolfo e abbondanza di ossigeno. Per concentrazioni inferiori allo 0,05% è irritante per occhi e mucose, per concentrazioni maggiori è mortale in tempi brevi.

2.9.10 Ossidi di azoto - NO_x

Derivano dalla combustione di nitrati organici, ammonio e nitroglicerina. Sono molto tossici e già a concentrazioni dello 0,02% diventano mortali.

2.9.11 Formaldeide - CH_2O

L'aldeide formica o formaldeide, gas di odore pungente e irritante, presenta notevoli problematiche legate alle sue proprietà chimico-fisiche (alta reattività e volatilità) e tossicologiche nonché alla sua sospetta cancerogenicità.

Il suo impiego principale è nella produzione di resine, in particolare fenoliche, melamminiche e per questo può trovarsi tra i prodotti della combustione delle comuni materie plastiche.

CAPITOLO 3

ASPETTI CARATTERISTICI DI UN INCENDIO IN GALLERIA

3.1 INTRODUZIONE

L'incendio in galleria è uno tra gli eventi più catastrofici che si possano verificare durante la circolazione di beni e persone. L'altissima temperatura, la minima possibilità di fuga e l'impossibilità di smaltimento del fumo e del calore rendono questo tipo di incendio molto pericoloso.

E' la stessa struttura costruttiva di una galleria a rendere la lotta contro gli incendi enormemente complessa, a causa soprattutto delle limitate possibilità di fuga, delle difficoltà di intervento da parte delle squadre di soccorso e dall'intenso calore che si genera in una situazione di dispersione termica così limitata.

Nell'ultimo decennio si sono verificati almeno 10 incendi di grandi dimensioni, in tunnel stradali o ferroviari, che hanno provocato un numero impressionante di vittime ed enormi perdite economiche, come nel caso del San Gottardo, del Tunnel della Manica, del Traforo del Monte Bianco e di altri episodi meno noti ma non per questo meno importanti.

Dal punto di vista economico, inoltre, i danni sono spesso di dimensioni enormi sia a causa dei costi di riparazione che di quelli relativi alla chiusura del tunnel a cui, non ultimi, vanno ad aggiungersi i costi indotti nelle zone circostanti (turismo, microeconomia, valore delle costruzioni, etc.).

Dunque, l'importanza di proteggere un tunnel da un'eventuale accadimento incidentale d'incendio riguarda tre notevoli aspetti:

- **Salvaguardia delle vite umane**. La protezione non è legata ad una vera e propria protezione strutturale, che sarebbe inutile per questo scopo, quanto ad una corretta progettazione e costruzione degli impianti di sicurezza quali estrattori di fumo, sistemi d'illuminazione d'emergenza, rifugi, etc.. All'interno di un tunnel la salvaguardia delle persone è legata alla propagazione, al controllo del fuoco ed alla limitazione dei suoi danni sui punti sensibili e nevralgici dei sistemi di sicurezza attiva, più che alla stabilità degli elementi portanti.

- **Sicurezza strutturale**. Per sicurezza strutturale si intende la salvaguardia della struttura per evitare collassi o danni permanenti che potrebbero provocare deterioramenti addizionali alle altre strutture o danneggiamenti ai soccorritori. Tali danni comportano una spesa di riparazione che spesso è notevolmente più alta della ricostruzione completa della sezione di tunnel danneggiata. In tutti i casi analizzati scientificamente, inoltre, si è notato il verificarsi di un consistente effetto spalling sul cemento esposto al fuoco (cioè di deterioramento del rivestimento cementizio).
- **Danni economici indotti**. I danni economici totali provocati da un incendio derivano non solo dal deterioramento del tunnel (e quindi dalla sua riparazione), ma soprattutto dai costi aggiuntivi sui trasporti, dai tempi di percorrenza più lunghi, dalle perdite dell'economia locale e, infine, dalle ripercussioni, anche psicologiche, sui servizi indotti dal tunnel stesso. Un chiaro esempio di quanto detto è sicuramente costituito dall'incendio dell'Eurotunnel, dove il costo indotto è stato stimato a più del doppio di quello della sola riparazione. L'intervento di ricostruzione, infatti, è costato 87 milioni di Euro. I costi addizionali in termini di perdite economiche materiali e l'impatto della chiusura del tunnel hanno portato ad un costo addizionale di 211 milioni di Euro, per un totale di quasi 300 milioni.

3.2 LA TEMPERATURA E LE CURVE D'INCENDIO

Negli ultimi anni sono stati eseguiti molti studi internazionali per meglio comprendere l'evoluzione dell'incendio all'interno di un tunnel, con ricerche condotte a scala reale all'interno di gallerie in disuso che in laboratorio a scala ridotta. I risultati acquisiti hanno permesso di entrare nel merito di diversi fenomeni ed in particolare di derivare alcune curve temperatura - tempo, dette **curve d'incendio**.

Le curve di incendio descrivono l'evoluzione delle temperature al passare del tempo e vengono utilizzate per dimensionare gli elementi resistenti o per definire il carico termico al quale devono resistere i rivestimenti protettivi, oltre che per fornire stime sui valori delle temperature potenzialmente riferibili ad un determinato scenario di fuoco. Esse costituiscono infatti dei modelli di stima, basati su dati empirici, che rappresentano tipologie definite di incendi.

Sebbene molti studi siano ancora in corso, appare ormai chiaro che le temperature che si possono registrare in un ambiente confinato, ed in particolare all'interno di un tunnel, sono

sempre superiori a quelle che si avrebbero con lo stesso carico d'incendio in un ambiente non confinato (o all'interno di un edificio dotato di aperture verso l'esterno e muri capaci di disperdere calore con elevato rendimento).

Di seguito può trovarsi una breve rassegna delle principali curve utilizzate nel progetto e nella verifica della sicurezza antincendio dei principali paesi industrializzati. Sono curve in genere non nate per le gallerie.

3.2.1 Le curve di incendio in generale

Una curva standard usata per testare l'esposizione alla temperatura di una data struttura è la curva ISO 834, detta curva cellulosica, definita in molti standard progettuali [16].

Questa curva si applica con successo da diversi anni nella valutazione della resistenza al fuoco dei materiali tipicamente presenti all'interno di un edificio.

Per molti anni la **curva ISO 834** è stata usata anche per il progetto della resistenza al fuoco delle strutture dei tunnel, ma è ormai chiaro che questa curva non rappresenta adeguatamente tutti i materiali di potenziale interesse, con particolare riferimento ai derivati del petrolio. Per ovviare a questa affermata consapevolezza è stata successivamente applicata ai tunnel la **curva HC** [17], detta curva degli idrocarburi, sviluppata negli anni '70 per l'uso nell'industria petrolchimica e nel progetto degli off-shore.

Negli anni seguenti, in diversi paesi, sono state sviluppate curve specifiche per simulare la combustione degli idrocarburi nei tunnel. Esempi sono la **curva RABT/TZW** sviluppata in Germania [18] e la curva del Rijkswaterstaat Tunnel, detta **curva RWS**, sviluppata in Olanda sulla base di esperimenti a scala ridotta condotti in laboratorio intorno alla fine degli anni '70 [19,20]. In Francia è stata usata una versione modificata della curva degli idrocarburi, detta **curva HCmod**, che è data dalla curva tradizionale degli idrocarburi incrementata di un fattore 1300/1100, mentre in Italia lo standard di riferimento è stato per molti anni un'altra ulteriore curva, detta **curva standard italiana**.

Oggi, anche in Italia, la curva di riferimento per il progetto termico dei tunnel è la curva RWS. Essa è sicuramente la più rappresentativa fra quelle proposte a livello continentale ed è quella utilizzata da anni nei paesi più evoluti nella lotta agli incendi nelle gallerie.

L'associazione mondiale della strada PIARC, raccomanda l'uso della curva ISO 834 (60 min) per automobili e furgoni e l'uso della curva HC modificata (120 min) per autocarri,

autoarticolati e autocisterne [21,22]. Queste raccomandazioni sono del tutto congruenti con quelle dell'International Tunneling Associations, ITA [23].

Tipo di veicolo	Temperatura massima sviluppabile
Automobile	400 °C
Bus	700 °C
HGV	1000 °C
Autocisterna di combustibile	1200 °C ÷ 1400 °C

Tabella 3.1 - Massimi valori di temperatura sviluppabili nell'incendio in funzione del tipo di veicolo secondo le prescrizioni PIARC, in accordo con le norme NFPA 502.

3.2.2 La curva di incendio di materie cellulosiche ISO 834

Questa curva è universalmente utilizzata per quantificare l'incendio di progetto negli edifici civili (scuole, uffici, ospedali, alberghi, etc.). Tutti gli standard internazionali utilizzano questo programma termico oppure curve molto simili, come ad esempio in Italia dove si utilizza la curva prevista dalla circolare 91 del 14 settembre 1961[5].

La curva ISO 834 simula un normale incendio da materiale cellulosico in ambiente con ventilazione sufficiente. E' opinione comune che la questa curva sia poco rappresentativa di un reale incendio che ha un andamento completamente diverso, ma il suo utilizzo può dare indicazioni accettabili circa il comportamento dei materiali in situazioni successive al flashover. E' altrettanto evidente che la ISO 834 è del tutto inadatta per verificare il comportamento strutturale all'interno dei tunnel.

3.2.3 La curva di incendio da idrocarburi

La curva da idrocarburi è perfettamente applicabile nel caso si vogliano considerare gli effetti di un piccolo incendio di benzina, o analogo combustibile liquido, come ad esempio

[5] La curva standard italiana, rispetto alla curva cellulosica, prevede temperature maggiori in valore assoluto ed un legame temperatura - tempo più critico per la prova dei materiali. Il suo andamento è stato definito dalla Circolare n. 91 del 14 settembre 1961 emanata dal Ministero dell'Interno, Direzione Generale dei Servizi Antincendi.

l'incendio del serbatoio di un'automobile, di una cisterna di petrolio, di un piccolo deposito di materiale chimico combustibile, etc..

Analogamente alla ISO 834, la curva da idrocarburi è totalmente diversa da quella di un incendio reale, ma il suo utilizzo permette di agire in condizioni standard e di operare scelte con un certo margine di sicurezza.

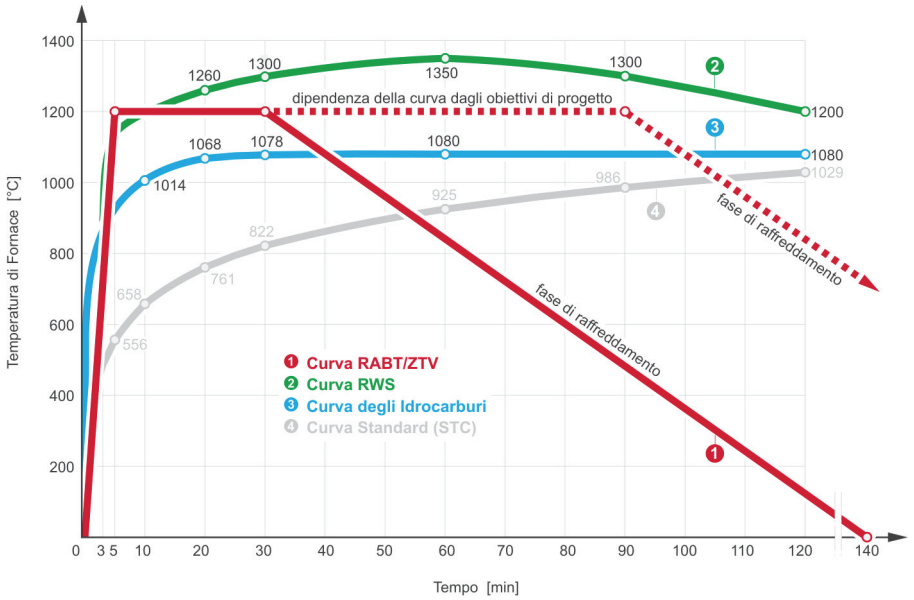

Figura 3.1 - Confronto tra varie curve d'incendio.

3.2.4 La curva RWS o UNI 11076

La curva RWS, adottata in Italia con la norma UNI 11076 "Modalità di prova per la valutazione del comportamento di protettivi applicati a soffitti di opere sotterranee, in condizioni di incendio" pubblicata nel dicembre 2003, è universalmente riconosciuta come una delle curve più rappresentative all'interno dei tunnel.

Essa è rappresentativa dell'incendio di un'autocisterna carica di petrolio, cui può attribuirsi un HRR di picco pari a circa 300 MW.

Questa curva è basata sui risultati di alcuni test eseguiti in Olanda su una galleria a

scala ridotta, lunga 8,00 m e avente sezione rettangolare di 2,00 x 2,00 m^2, con pozze di petrolio come sorgenti di fuoco e con temperature dei gas individuate tra 900 °C e 1360 °C.

Quasi tutti i paesi che utilizzano la curva RWS, compresa l'Italia, hanno deciso di limitare il programma termico a due ore, in quanto si presume che dopo tale tempo i soccorritori siano in grado di avvicinarsi alla fonte di fuoco e cominciare la loro opera di spegnimento.

I recenti casi di incendi di grandi dimensioni, ed in particolare l'incendio del Monte Bianco, hanno dimostrato che le temperature all'interno delle gallerie sono troppo alte per consentire un intervento di soccorso anche dopo molte ore e quindi alcune nazioni hanno pensato di estendere la curva RWS fino a 180 minuti (Austria e Svizzera).

In maniera complementare alla curva RWS l'attuale legislazione tedesca impone che la temperatura all'interfaccia tra il calcestruzzo e la membrana protettiva non ecceda i 380 °C e che la temperatura delle strutture portanti non superi i 250 °C.

3.2.5 La curva di incendio RABT ZTV

Questa curva ha caratteristiche simili alla RWS per i primi cinque minuti, condividendo lo stesso concetto di salita rapida delle temperature all'inizio della combustione, ma poi assume una forma piatta e costante a 1200 °C fino a 30 minuti, per poi diminuire in modo lineare fino alla temperatura ambiente dopo 140 minuti.

Sebbene questa curva rappresenti in modo corretto l'incendio di un tunnel ferroviario è difficile immaginare la sua applicazione nei tunnel autostradali o, comunque, per rappresentare l'incendio di sostanze combustibili liquide, dove le temperature in gioco sono sicuramente più alte. Per questo motivo il suo utilizzo è accettato solo in pochissime nazioni.

3.2.6 La curva di incendio da idrocarburi modificata

La curva HCM rappresenta una sorta di buon compromesso fra la curva tradizionale da combustibile liquido o gassoso ed il reale andamento temperatura / tempo che si può verificare nell'incendio di un tunnel.

Il programma termico HCM è profondamente diverso (e decisamente più severo) rispetto a quello degli idrocarburi. Alcuni paesi, fra i quali la Francia, hanno adottato questo programma termico per la verifica del comportamento al fuoco delle gallerie.

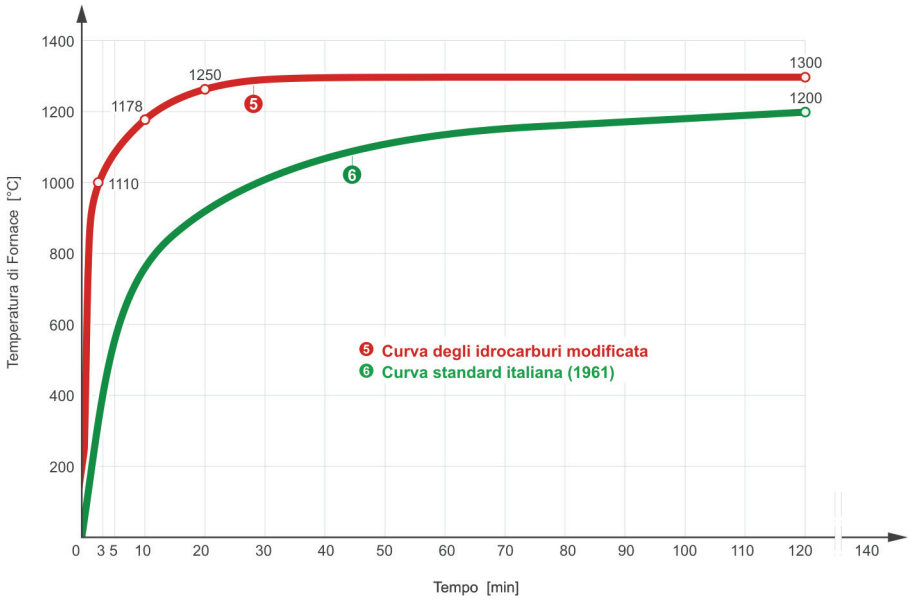

Figura 3.2 - Curve d'incendio addizionali.

3.3 VALORI DI PROGETTO PER L'HRR IN GALLERIA

L'HRR, ovvero il tasso di rilascio del calore, può sicuramente essere assunto come grandezza fondamentale per la valutazione di un incendio in galleria in quanto, nella letteratura specialistica della prevenzione incendi, esso viene definito come la grandezza fondamentale per la valutazione del rischio [23].

Nello studio di Helseden [28,29] si possono trovare valori di HRR pari a 3, 10, 20, 50 e 100 MW per descrivere rispettivamente l'incendio in galleria di un automobile, di un furgone, di un autocarro, di un autoarticolato o di un'autocisterna carica di combustibile.

I recenti eventi catastrofici avvenuti in Europa hanno mostrato che gli incendi in cui restano coinvolti diversi HGV[6], anche con carichi considerati "non rischiosi", possono produrre una grande quantità di calore e di fumo, determinando eventi incidentali

[6] Acronimo di Heavy Goods Vehicle: mezzi pesanti per il trasporto di beni civili.

estremamente difficili da combattere.

In tutti i casi catastrofici l'HRR è sempre stato superiore ai 100 MW, ed ha raggiunto in ben tre casi valori compresi tra 300 MW e 400 MW [6], vedi la Tabella 5.3.

Questo va in contrasto con i valori prescritti da numerose normative che permettono di assumere per il caso degli HGV che trasportano merci ordinarie (non liquidi combustibili o altri prodotti ad alto rischio) valori di HRR relativamente bassi, vedi la Tabella 3.2.

Tipo di veicolo	PIARC [2]	Norme Francesi [17]	NFPA [18]
1 piccola automobile	2,5 MW	2,5 MW	-
1 grande automobile	5 MW	5 MW	5 MW
da 2 a 3 automobili	8 MW	8 MW	-
1 furgone	15 MW	15 MW	-
1 Bus	20 MW	20 MW	20 MW
1 HGV	20 ÷ 30 MW	20 ÷ 30 MW	-
1 Autocisterna	100 MW	100 MW	100 MW

Tabella 3.2 - Valori di progetto per l'HRR nella valutazione di incendi nei tunnel secondo differenti normative. L'elenco è aggiornato al 2003. Alla luce di quanto osservato negli eventi degli ultimi anni, i valori presentati sembrano notevolmente bassi.

Alla luce di queste considerazioni diversi team di ricerca, in Europa e nel mondo, hanno cominciato a porre nuove attenzioni sulla misura dell'HRR potenzialmente disponibile nell'incendio di merci ordinarie, avviando e sviluppando numerosi test a scala reale.

Ad esempio, i risultati dei test eseguiti sul Runehamar Tunnel nel 2003 permettono di affermare che per HGV ordinari, ovvero caricati con carichi considerati a basso rischio (cellulosa e plastica), possono aversi picchi di HRR compresi tra 66 MW e 202 MW che corrispondono invece al valore dato dalle normative per l'incendio di un'autocisterna carica di combustibile liquido.

Questi valori sono stati discussi dalle autorità internazionali per la standardizzazione della sicurezza e ci si può aspettare che nel corso degli anni a venire le prescrizioni attuali subiranno una revisione verso l'alto per l'adeguamento a questi nuovi rilievi.

Relativamente al caso delle ferrovie esiste infatti un gran numero di team internazionali di ricerca, il cui obiettivo è quello di armonizzare le infrastrutture ferroviarie e le procedure

cui sono soggette, al fine di produrre un continuo incremento della sicurezza.

Esempi di questi gruppi sono l'Unione Internazionale delle Ferrovie (Unione Internationale de Chemin de fer, UIC) il gruppo di esperti UN ECE e l'associazione europea per l'interoperabilità ferroviaria (Association Européenne pour l'Interopérabilité Ferroviaire, AEIF) [14].

Veicolo	N° di test	Energia [GJ]	HRR MAX [MW]	Media HRR MAX [MW]	Tempo per HRR MAX [min]
automobile	15	2 ÷ 8	1,5 ÷ 8,5	4,1	10 ÷ 38
2 automobili	7	5 ÷ 10	5,6 ÷ 10	7,6	13 ÷ 55
3 automobili	1	NA	8,9	8,9	33
bus	2	41	29 ÷ 30	29,5	7 ÷ 8
HGV	10	10 ÷ 244	13 ÷ 202	NA	8 ÷ 18

Tabella 3.3 - Riepilogo dei valori di HRR ottenuti in diversi esperimenti, con differenti tipi di veicolo, fornita da Ingason e Lönnemark e comprendente i risultati degli esperimenti del Runehamar Tunnel.

Per via del costante incremento di trasporto merci su ferrovia e del conseguente miglioramento delle infrastrutture rotabili, la domanda di trasporto passeggeri è anch'essa destinata a crescere. Tuttavia, le norme attuali non permettono di stilare una tabella per la stima dei valori di HRR potenzialmente riscontrabili nell'incendio di normali carrozze civili. Questo aspetto rappresenta una discussione aperta e diversi valori sono stati proposti, a seguito di numerosi test [14], per l'incendio di progetto di questi "veicoli".

3.4 I TEST E LE ESPERIENZE DI LABORATORIO

La prima serie di test di larga scala che ha permesso di valutare i valori di HRR ed i valori delle temperature dei gas di combustione corrispondenti all'incendio di grandi e reali veicoli ferroviari (carrozze passeggeri, vagoni merci, carrozze metropolitane e HGV) è stato il progetto EUREKA 499 - FIRETUN sviluppato tra il 1990 ed il 1992.

Nel corso degli anni precedenti sono comunque stati eseguiti numerosi test che hanno cercato di investigare le grandezze caratteristiche di un incendio in galleria. Tra essi si annoverano quelli effettuati nel 1965 nell'Offenegg tunnel in Svizzera, quelli di Glasgow in

Scozia nel 1970 all'interno di un tunnel ferroviario dismesso, gli esperimenti del Zwenberg tunnel in Austria nel 1975 ed altri esperimenti avvenuti in Giappone nel 1980.

La serie di test più recente risale invece al 2003 con gli esperimenti del Runehamar Tunnel in Norvegia, a seguito dei quali il Dipartimento di Fire Safety Engineering del "Lund Institute of Technology" della norvegese "Lund University" ha compilato una serie di interessantissimi studi [26].

In funzione dei test del progetto EUREKA, condotti su vetture ferroviarie nel Repparfjord Tunnel in Norvegia tra il 1990 ed il 1992, e di altri test condotti su altri vagoni ferroviari, può sintetizzarsi la Tabella 3.4, di notevole interesse per il lavoro di questa tesi.

La Tabella 3.4 evidenzia, in particolare, come a valori maggiori di energia possano corrispondere HRR più bassi. Ciò è sicuramente attribuibile all'influenza che hanno le condizioni di ventilazione sullo sviluppo del fuoco: tanto maggiore è il ricambio di ossigeno, tanto più efficiente e potente sarà la combustione. Il numero, la forma e le caratteristiche complessive del sistema di aperture del vagone nonché le caratteristiche del particolare incidente (eventuale rottura dei finestrini o altro), hanno notevole influenza sull'HRR.

Tipo di veicoli, test	Energia [GJ]	HRR di picco [MW]	HRR [MW] / ENERGIA [GJ]
assemblamento di due mezze carrozze una di alluminio ed una di acciaio, EUREKA 499	55	43	0,78
carrozza German Intercity-Express, EUREKA 499	63	19	0,30
carrozza passeggeri German Intercity, EUREKA 499	77	13	0,17
carrozza passeggeri, British Rail 415	n.d.	16	n.d.
carrozza passeggeri con tappezzeria resistente al fuoco, British Rail Sprinter	n.d.	7	n.d.
German subway car, EUREKA 499	41	35	0,85

Tabella 3.4 - Valori di Energia e di HRR per veicoli ferroviari.

Si riporta di seguito una tabella sintetica degli esperimenti più importanti condotti dal 1965 ad oggi. Per una conoscenza più approfondita di queste esperienze si rimanda alle bibliografie [26-37].

Luogo	n° test	Lunghezza del Tunnel e caratteristiche della sezione trasversale			Fonte di fuoco	Misure effettuate
		L [m]	H [m]	A [m^2]		
Ofenegg, Svizzera 1965	11	190	6	23	Petrolio 6,6 - 47,5 - 95 m^2	T, u, CO, O_2, fumi
Glasgow, UK 1970	5	620	5,2	39,5	Kerosene 1,44 - 2,88 - 5,76 m^2	T, fumi, propagazione del fuoco
Zwenberg, Austria 1975	30	390	3,9	20	Petrolio 6,8 - 13,6 m^2 legno, gomma	T, u, CO, CO_2, O_2, NO_x, THC, visibilità
TNO, NL 1979-80	2	8	2	4	Petrolio ~ 3 m^2	T, umidità
P.W.R.I, Japan 1980	16	700	~ 6,8	57,3	Petrolio 4 - 6 m^2 automobili, bus	T, u, CO, fumi, calore radiativo
Kakeihigasi Tunnel, P.W.R.I, Japan 1980	8	3277	~ 6,8	58	Petrolio 4 m^2 bus	T, u, CO, O_2, calore radiativo
TUB-VTT, Finland 1985	2	140	5	24 - 31	legno, simulazione di una collisione tra 2 vetture in metropolitana	T, u, CO, CO_2, O_2, visibilità, altezza dei fumi
Repparfjord, EUREKA NO 1990-92	21	2300	4,8 - 5,5	25 - 35	legno, eptano, vetture ferroviarie, HGV	HRR, T, u, CO, CO_2, O_2, SO_2, C_xH_y, NO, visibilità, fumi, propagazione del fuoco
Memorial, USA 1993-95	98	853	4,4 - 7,9	36 - 60	olio combustibile 4,5 - 45 m^2	T, u, CO, CO_2, CH_4, THC, visibilità, fumi
Shimizu n°3, Japan 2001	10	1120	8,5	115	Petrolio 1 - 4 - 9 m^2, automobili, bus	T, u, calore radiativo
2nd Benelux, NL 2002	14	872	5,1	50	n-eptano, toluene, automobili, furgoni, HGV pallets	T, u, CO, calore radiativo, fumi, visibilità, sistemi di rilevazione del fuoco
Runehamar, NO 2003	4	1600	5 - 6	32 - 47	cellulosa, rivestimenti di plastica	HRR, T, u, CO, CO_2, O_2, HCN, H_2O, isocianati, calore radiativo

Tabella 3.5 - Riepilogo dei principali test d'incendio condotti all'interno di varie gallerie.

3.5 PROPAGAZIONE E TEMPERATURA DI UN INCENDIO IN GALLERIA

Studiando lo sviluppo e la lunghezza delle fiamme di diversi incendi in galleria, Rew e Daves hanno identificato cinque differenti meccanismi per l'espansione di un fuoco tra i vagoni di un treno all'interno di un tunnel ferroviario [1]:

1. contatto diretto del vagone con le fiamme (flame impingement);
2. propagazione delle fiamme lungo le superfici del tunnel e dei vagoni (flame spread);
3. propagazione delle fiamme da un vagone ad un altro a seguito del flashover;
4. propagazione per via del moto di tizzoni infuocati e particelle di liquido incendiato a valle del fuoco;
5. propagazione violenta delle fiamme per esplosione.

L'estensione delle fiamme al di sotto del soffitto è un importante fattore da considerare poiché può influenzare contemporaneamente i meccanismi 1 e 3, e può anche incrementare la propagazione del fuoco lungo una superficie (meccanismo 2).

In questa sezione si vuole dare una breve e sintetica descrizione di come si può stimare la temperatura e l'estensione di una fiamma durante un "tunnel fire".

Nel campo degli incendi non confinati esistono diverse relazioni per la previsione dell'altezza di un fuoco così come per il calcolo di altre differenti proprietà dei plumi [2-40]. Una delle relazioni più comuni per il calcolo dell'altezza di una fiamma, valida per combustioni in ambiente aria di combustibili liquidi tipici [40], è stata suggerita da Heskestad:

$$h_f = -1{,}02 \cdot D + 0{,}235 \cdot \dot{Q}^{2/5} \tag{3.1}$$

dove $\mathbf{h_f}$ [m] è l'altezza libera di fiamma (misurata dalla base della superficie che brucia), $\dot{\mathbf{Q}}$ [kW] è l'HRR totale e **D** [m] è il diametro fisico del focolaio.

La possibilità di considerare tale relazione nello studio di una fiamma in galleria è subordinata alla valutazione di due importanti aspetti: essa è stata sviluppata per incendi a propagazione libera, cioè privi di un limite di sviluppo superiore; i tipi di fuoco inviluppati dalla equazione non includono i fuochi tridimensionali, ovvero i fuochi profondamente radicati (deep-seated fires: panchine di legno, pallets, etc.) [42].

In ogni caso, Heskestad ha mostrato che anche i casi tridimensionali sono ragionevolmente ben rappresentati se l'altezza della fiamma è calcolata a partire dalla base della regione di combustione e se il diametro usato nella formula è definito come diametro del cerchio equivalente all'area $\mathbf{A_c}$ [m^2] orizzontale del focolaio (non l'area totale esposta al fuoco) [43]:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A_c}{\pi}} \tag{3.2}$$

Nello studio di McCaffrey [65], si può trovare una differente versione della formula di Heskestad, scritta in funzione dell'HRR adimensionale $\dot{\mathbf{Q}}^*$ sempre in ambiente aria:

$$\frac{h_f}{D} = 3{,}7 \cdot \left(\dot{Q}^*\right)^{2/5} - 1{,}02 \tag{3.3}$$

McCaffrey pose inoltre l'attenzione sul fatto che è estremamente difficile identificare l'altezza libera media di una fiamma.

Un'ulteriore relazione per il calcolo dell'altezza libera di una fiamma, basata sull'HRR adimensionale $\dot{\mathbf{Q}}^*$ è stata sviluppata da Zucowsky [53]:

$$h_f = 3{,}3 \cdot \left(\dot{Q}^*\right)^{2/3} \tag{3.4}$$

per $1 < \dot{Q}^* < 40$ con

$$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot g^{1/2} \cdot D^{5/2}} \tag{3.5}$$

dove $\mathbf{T_a}$ [K] è la temperatura ambiente, $\dot{\mathbf{Q}}$ è l'HRR totale del fuoco [kW], **g** [9,806 m/s] è l'accelerazione di gravità, $\mathbf{c_p}$ [1,009 $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$] è il calore specifico a pressione costante dell'aria e $\boldsymbol{\rho_a}$ è la densità dell'aria a 20°C [1,225 Kg/m^3].

Altre relazioni sono state introdotte da McCaffrey e Babrauskas.

Gli incendi che avvengono in galleria sono da considerarsi, ovviamente, come **incendi**

confinati in cui l'influenza del soffitto e dei muri è un fatto sostanziale.

Babrauskas, studiando le fiamme di un incendio confinato superiormente, ha cercato di stimare la lunghezza della fiamma comparando l'entrainment[7] di un ceiling jet con l'entrainment di un fuoco non confinato [45].

Se si indicano con $\mathbf{h_f}$ l'altezza libera della fiamma, con $\mathbf{H_f}$ l'altezza della fiamma confinata e con $\mathbf{h_r}$ l'estensione radiale della fiamma al di sotto del soffitto, Babrauskas afferma che:

$$1{,}2 \le \frac{h_r}{h_f - H_f} \le 2{,}0 \qquad \Rightarrow \qquad 0{,}5 < H_f / h_f < 0{,}85 \tag{3.6}$$

bisogna però notare dai valori del rapporto H_f/h_f che i fuochi studiati da Babrauskas sono molto piccoli, ovvero molto più piccoli di quelli appartenenti al campo di interesse della sicurezza antincendio in galleria.

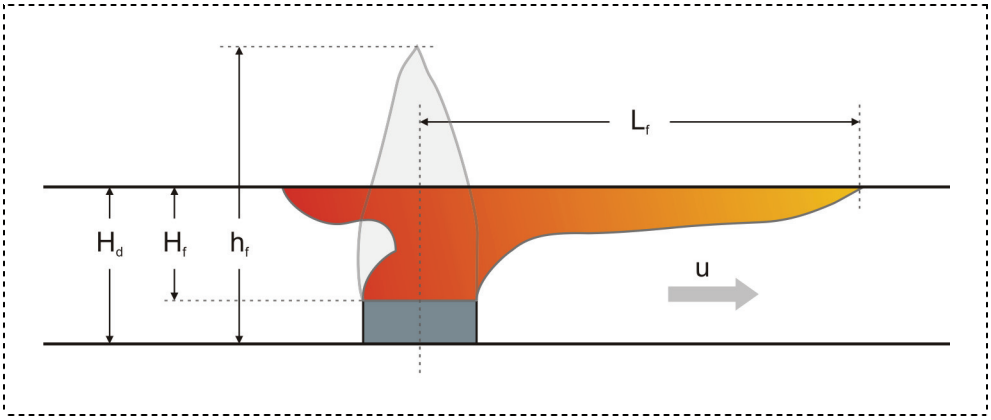

Figura 3.3 - Definizione dei parametri per il calcolo delle caratteristiche di una fiamma

Babrauskas studiò anche l'evoluzione del plume all'interno di un corridoio mostrando che

[7] Come già visto, con il termine "entrainment" la lettura specialistica indica il fenomeno di miscelatura al contorno del plume tra l'aria calda e l'aria ambiente circostante più fredda, che generalmente porta ad un sostanziale abbassamento della temperatura media dei fumi.

$$\frac{L_f}{h_f - H_f} \approx 2 \tag{3.7}$$

con una forte dipendenza di questo rapporto dal valore della larghezza del corridoio che, ad esempio decrementata da 3 a 2 m porta il valore di L_f da 2 a 2,94 m. Anche in questo caso, però, il campo di HRR studiato appartiene a quello dei fuochi di piccola taglia.

Un lavoro simile a quello di Babrauskas è stato condotto da Heskestad e Hamada, valutando un incendio a base di propano e mostrando che

$$0{,}88 < \frac{L_f}{h_f - H_f} < 1{,}05 \tag{3.8}$$

con un valore medio di tale rapporto pari a 0,95 [64].

3.5.1 L'esperienza di Kurioka

Nel 2003, gli studi di Hitoshi Kurioka [51] della Yokohama National University, hanno permesso di derivare una relazione empirica per il calcolo della temperatura al di sotto del soffitto di un tunnel, e di altre grandezze interessanti la zona del fuoco.

Volendo comprendere il fenomeno fuoco nel campo prossimo alla sua fonte, all'interno di ambienti confinati come le gallerie sempre caratterizzati da valori non trascurabili di ventilazione longitudinale, Kurioka condusse una serie di esperimenti su tunnel a scale diverse, sia con sezioni rettangolari che a ferro di cavallo, facendo riferimento a fonti di fuoco quadrate e variando l'aspetto delle gallerie, cioè il rapporto tra le dimensioni (altezza e larghezza) della sezione, oltre all'HRR ed alla velocità di ventilazione longitudinale.

Il primo punto su cui pone l'attenzione Kurioka, a seguito dell'osservazione dello sviluppo di un incendio in galleria, è che bisogna fare differenza tra due tipi di situazioni: la prima si ha quando lo sviluppo verticale della fiamma è tale da non farla arrivare al soffitto, la seconda si ha, invece, quando il suo sviluppo è tale da farla ivi infrangere.

Egli afferma inoltre che è non è possibile, per via dell'effetto della ventilazione, descrivere la configurazione di una fiamma realizzando un modello che tenga conto di un unico valore angolare di deflessione (Figura 3.4 - Figura 3.5).

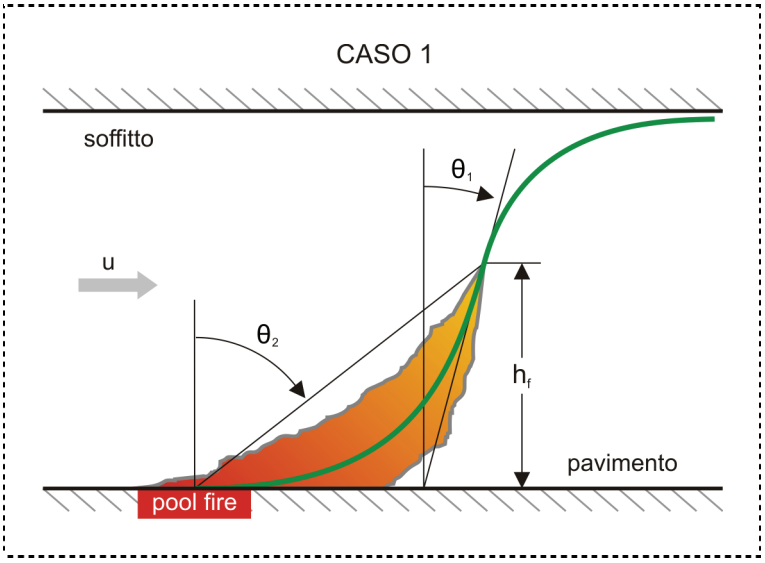

Figura 3.4 - Definizione delle grandezze caratteristiche di una fiamma in galleria secondo Kurioka, nel caso in cui lo sviluppo verticale della fiamma interessa parzialmente lo sviluppo verticale della galleria.

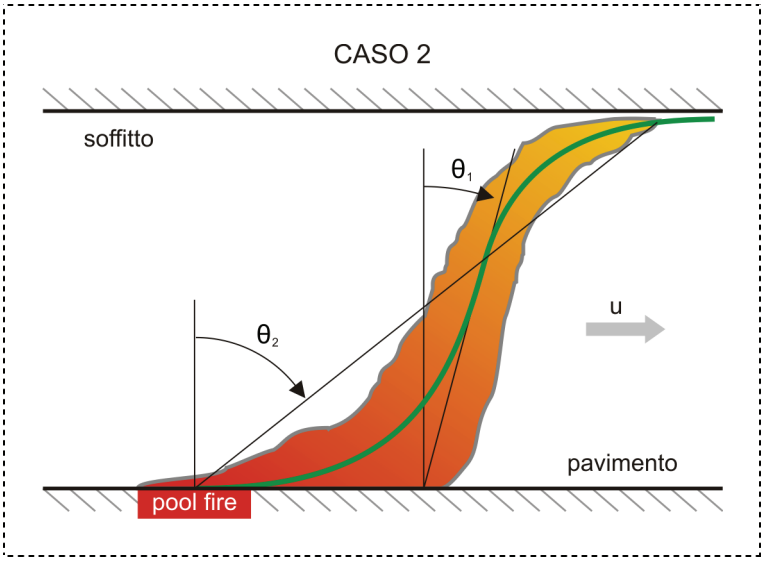

Figura 3.5 - Definizione delle grandezze caratteristiche di una fiamma in galleria secondo Kurioka, nel caso in cui la fiamma si infrange contro il soffitto.

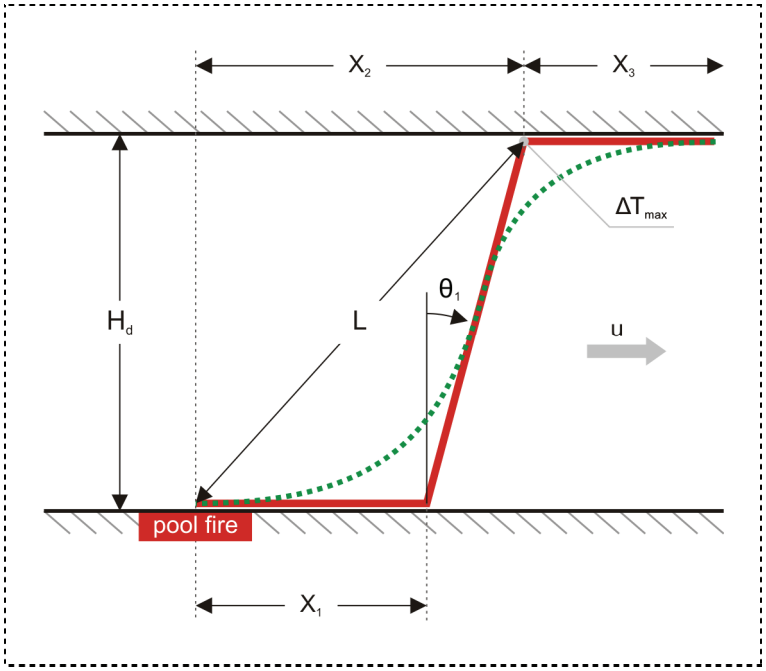

Figura 3.6 - Definizione delle altre variabili: le linee continua e punteggiata indicano rispettivamente la traiettoria del modello e quella reale.

L'esperienza di Kurioka è basata, principalmente, sulle seguenti ipotesi:

- l'origine del fuoco è quadrata o al più circolare;
- l'influenza della ventilazione alla base della fiamma è trascurabile;
- i valori della velocità di ventilazione longitudinale sono modesti e tali da consentire la formazione di uno strato caldo superiore ed uno strato freddo inferiore, piuttosto che di un unico strato ben miscelato.

Dai risultati di questo lavoro sono state sviluppate diverse correlazioni: per investigare l'inclinazione di fiamma, l'apparente altezza di fiamma, la massima temperatura dello strato di fumo e la sua posizione. Le relazioni che seguono sono quelle che permettono il calcolo della temperatura massima dello strato di fumo $\mathbf{T_{max}}$

$$\frac{\Delta T_{max}}{T_a} = \gamma \cdot \left(\frac{\dot{Q}^{*2/3}}{F_r^{1/3}} \right)^{\varepsilon} \tag{3.9}$$

$$\dot{Q}^{*} = \frac{\dot{Q}}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot g^{1/2} \cdot H_d^{5/2}} \tag{3.10}$$

$$F_r = \frac{u^2}{g \cdot H_d} \tag{3.11}$$

$$\frac{\dot{Q}^{*2/3}}{F_r^{1/3}} \geq 1{,}35 \rightarrow \gamma = 2{,}54 \rightarrow \varepsilon = 0 \tag{3.12}$$

$$\frac{\dot{Q}^{*2/3}}{F_r^{1/3}} < 1{,}35 \rightarrow \gamma = 1{,}77 \rightarrow \varepsilon = 6/5 \tag{3.13}$$

dove $\mathbf{\Delta T_{max}}$ [°C] è la differenza di temperatura del fuoco rispetto alla temperatura ambiente $\mathbf{T_a}$ [K], $\mathbf{F_r}$ è il numero adimensionale di Froude, $\dot{\mathbf{Q}}$ [kW] è l'HRR totale del fuoco, $\dot{\mathbf{Q}}^{*}$ è l'HRR adimensionale, $\boldsymbol{\gamma}$ ed $\boldsymbol{\varepsilon}$ sono costanti sperimentali adimensionali, **g** [9,806 m/s] è l'accelerazione di gravità, $\mathbf{c_p}$ [1,009 $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$] è il calore specifico a pressione costante dell'aria, $\boldsymbol{\rho_a}$ è la densità dell'aria a 20°C [1,225 Kg/m^3], $\mathbf{H_d}$ [m] è la quota del soffitto rispetto alla superficie che brucia ed **u** [m/s] è il valore della velocità di ventilazione longitudinale presente, sia essa naturale, artificiale o somma di entrambi i contributi.

Nell'ambito degli esperimenti condotti da Kurioka, il massimo eccesso di temperatura misurato dagli esperimenti $\mathbf{\Delta T_{max}}$ è stato di circa 800 K.

Dati riguardanti l'incendio del tunnel del Monte Bianco, raccontano che la massima temperatura registrata all'interno della galleria non ha superato i 1000 K. Questo permette di immaginare, in ogni incendio confinato, l'esistenza di un punto di massimo per la configurazione delle temperature indipendente dal valore di HRR.

Dalle formule di Kurioka, si evince che oltre il limite superiore di circa 770 K, la T_{max} non cresce pur aumentando il valore della potenza. Ciò perché la formulazione di Kurioka, sulla base dell'esperienza del Monte Bianco, tiene conto di questo limite superiore.

Per calcolare la lunghezza **L** [m] occorre usare la formula seguente:

$$L = \alpha \left[\frac{\left(H^{3/2}/b^{1/2}\right)}{A_f^{1/2}} \cdot F_r \cdot \dot{Q}^{*(2\eta-1)/5} \right]^{\beta} \cdot \frac{H_d}{F_r^{1/2}} \tag{3.14}$$

dove $\mathbf{A_f}$ [m^2] è l'area della superficie incendiata, **H** [m] e **b**[m] sono rispettivamente l'altezza e la larghezza del tunnel, mentre α e β sono dei coefficienti empirici ricavabili dalla Tabella 3.6 in funzione di $\mathbf{\Delta T_{max}}$ il cui calcolo è propedeutico.

Di seguito si riportano invece le formule che permettono di individuare, secondo lo schema della Figura 3.6, la posizione dell'asse inclinato della fiamma.

$$\cos\theta_1 = \alpha \left[A_f^{1/2} \frac{b^{1/2}}{H^{3/2}} \dot{Q}^{*(1-2\eta)/5} \cdot F_r^{-1/2} \right] \beta \tag{3.15}$$

$$0{,}15 \le A_f^{1/2} \cdot \frac{b^{1/2}}{H^{3/2}} \dot{Q}^{*(1-2\eta)/5} \cdot F_r^{-1/2} < 1{,}25 \rightarrow \alpha = 0{,}80 \rightarrow \beta = 1 \tag{3.16}$$

$$1{,}25 \le A_f^{1/2} \cdot \frac{b^{1/2}}{H^{3/2}} \dot{Q}^{*(1-2\eta)/5} \cdot F_r^{-1/2} < 1{,}25 \rightarrow \alpha = 1 \rightarrow \beta = 0 \tag{3.17}$$

dove i simboli hanno i significati esposti in precedenza.

ΔT_{max}	η	α	β
< 250 K	-0,33	0,79	0,73
250 - 550 K	0,00	0,92	0,60
~ 550 K	0,50	1,02	0,56

Tabella 3.6 - Coefficienti per il calcolo della lunghezza L.

E' bene osservare che la formula di Kurioka è una delle poche presenti in letteratura che permette di considerare la velocità di ventilazione longitudinale come parametro.

3.5.2 Evoluzioni della correlazione di Kurioka

Nel 2005, Yasushi Oka e Hitoshi Kurioka hanno cercato di approfondire ulteriormente [52] quanto fatto dallo stesso Kurioka nel 2003, studiando l'ulteriore effetto della forma e della dimensione del focolaio sulle proprietà della fiamma.

In un tunnel a scala ridotta (circa 1/15) e con sezione rettangolare di aspetto H/b = ½ è stata studiata la combinazione di varie superfici d'incendio (quadrate e rettangolari, più grandi e più piccole), con HRR variabili tra 4,5 e 36 kW in maniera proporzionale alle superfici, variando anche la velocità di ventilazione longitudinale nel range 0,00 ÷ 0,80 m/s.

Essi giunsero alla conclusione che la forma e la dimensione del focolaio hanno un effetto sulle proprietà della fiamma che può non essere trascurato e che tale effetto può essere tenuto in considerazione introducendo, nelle formule del 2003, una nuova variabile adimensionale $(b/D_2)^{1/2}$, definita dalla radice quadrata del rapporto tra la larghezza **b** [m] del tunnel e la dimensione del focolaio nella direzione perpendicolare a quella della ventilazione longitudinale $\mathbf{D_2}$ [m]. Si riportano di seguito le formule di Kurioka modificate, rimandando al paragrafo precedente per la definizione delle grandezze di seguito non specificate,

$$\frac{\Delta T_{max}}{T_a} = \alpha_1 \cdot \left(\frac{\dot{Q}^{*2/3}}{F_r^{1/3}} \cdot \left(\frac{b}{D_2} \right)^{1/2} \right)^{\beta_1} \tag{3.18}$$

$$\frac{\dot{Q}^{*2/3}}{F_r^{1/3}} \cdot \sqrt{\frac{b}{D_2}} < 3{,}3 \rightarrow \alpha_1 = 0{,}60 \rightarrow \beta_1 = 6/5 \tag{3.19}$$

$$3{,}3 \leq \frac{\dot{Q}^{*2/3}}{F_r^{1/3}} \cdot \sqrt{\frac{b}{D_2}} < 8 \rightarrow \alpha_1 = 2{,}53 \rightarrow \beta_1 = 0 \tag{3.20}$$

$$L = \alpha_2 \left[\frac{\left(H^{3/2}/b^{1/2} \right)}{A_f^{1/2}} \cdot F_r \cdot \dot{Q}^{*(2\eta-1)/5} \right]^{\beta_2} \cdot \frac{H_d}{F_r^{1/2}} \cdot \left(\frac{D_2}{b} \right)^{1/2} \tag{3.21}$$

$$\cos\theta_1 = \alpha_3 \left[A_f^{1/2} \frac{b^{1/2}}{H_d^{2/3}} \dot{Q}^{*(1-2\eta)/5} \cdot F_r^{-1} \cdot \left(\frac{b}{D_2} \right)^{1/2} \right]^{\beta_3} \cdot F_r^{1/2} \tag{3.22}$$

ΔT_{max}	η	α_2	β_2	α_3	β_3
< 250 K	-0,33	3,00	0,71	0,54	0,63
250 - 550 K	0,00	3,70	0,67	0,46	0,66
~ 550 K	0,50	3,50	0,59	0,52	0,57

Tabella 3.7 - Coefficienti per il calcolo della lunghezza L e dell'angolo θ_1 nella nuova formulazione di Kurioka del 2005.

3.6 IL FENOMENO DEL BACKLAYERING

Anche quando esiste un consistente flusso d'aria longitudinale all'interno del tunnel, i prodotti della combustione possono muoversi verso l'esterno in entrambe le direzioni.

In altre parole, sotto certe condizioni geometriche e termodinamiche, la combustione può generare flussi di fumo che si muovono in senso contrario al movimento prevalente dell'aria.

Questo fenomeno è noto come "backlayering" e rappresenta un importante aspetto degli incendi nei tunnel poiché può essere d'impatto per la sicurezza degli occupanti: esso si manifesta quando la velocità dell'aria si trova al di sotto di un valore critico.

Thomas è stato il primo a presentare una relazione per la velocità critica necessaria a prevenire il flusso di ritorno dei fumi prodotti da un fuoco all'interno di un tunnel. Effettuando una comparazione tra velocità e galleggiamento egli propose la seguente equazione:

$$u_{cr} = k \cdot \left(\frac{g \cdot \dot{Q} \cdot H_t}{c_p T \cdot \rho_a \cdot A} \right)^{1/3} \tag{3.23}$$

dove **T** [K] è la temperatura dello strato di fumo (smoke layer), $\mathbf{H_t}$ [m] è l'altezza del tunnel, **A** [m^2] è l'area della sezione trasversale, $\dot{\mathbf{Q}}$ è l'HRR del fuoco [kW], **g** [9,806 m/s] è l'accelerazione di gravità, $\mathbf{c_p}$ [1,009 $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$] è il calore specifico a pressione costante

dell'aria e ρ_a è la densità dell'aria a 20°C [1,225 Kg/m^3].

Il valore della costante k non è stato determinato da Thomas, ma egli assunse che il suo valore è dell'ordine dell'unità. Un problema nell'utilizzo dell'Eq. (3.23) è la definizione della temperatura **T** [K] rappresentativa dello strato di fumo caldo.

Diverse altre relazioni sono state sviluppate dal lavoro di Thomas, alcune in funzione dell'HRR totale $\dot{Q}$ altre in funzione della sola sua frazione convettiva $\dot{Q}_c$, ma quasi tutte riconducibili al fattore **B** di galleggiamento:

$$B = \left(\frac{g \cdot \dot{Q}_c \cdot H_t}{c_p T \cdot \rho_a \cdot A} \right)^{1/3} \tag{3.24}$$

dove i simboli hanno lo stesso significato dell'Eq. (3.23).

Per calcolare la temperatura **T**, Helseden discusse l'effetto della radiazione trasmessa dal fumo sulla pelle nuda degli occupanti l'interno di un tunnel durante un incendio [61]. Egli si riferì al valore limite di 2 kW/m^2 come criterio per la causa di un dolore insopportabile dovuto alle ustioni, dopo un minuto di esposizione. Egli convertì questo valore in una temperatura dello smoke layer pari a 160°C. Questo porta all'evidente importanza del controllo dei fumi per le conseguenze che i loro flussi possono avere sugli occupanti.

Negli ultimi anni si è introdotto il nuovo termine della "velocità di confinamento". Mentre la "velocità critica" si definisce come quella velocità minima necessaria a contrastare il flusso dei fumi di combustione a monte del fuoco (upstream), e dunque a prevenire il backlayering, la "velocità di confinamento" è la minima velocità necessaria a bloccare un esistente fenomeno di backlayering in un dato punto.

3.7 EFFETTO DELLA VENTILAZIONE IN GALLERIA

I risultati presenti in letteratura mostrano che la ventilazione ha un effetto significativo sul valore di HRR e sulle condizioni generali in tunnel durante un incendio, ma è spesso difficile determinare le condizioni di ventilazione relative ad una certa situazione o ad uno specifico incremento di HRR, poiché è contemporaneamente necessario tenere in considerazione le condizioni di combustione complessive.

La ventilazione può essere uno strumento fondamentale per le strategie di sicurezza

finché l'evacuazione del fumo tende a migliorare le condizioni operative (visibilità, esposizione al calore, etc.).

D'altro canto, la ventilazione può anche essere responsabile di un peggioramento delle condizioni all'interno del tunnel, aumentando l'intensità dell'incendio con nuovo apporto di ossigeno, favorendo la propagazione del fuoco, o intrappolando gli occupanti del tunnel tra fumi e fiamme.

Le strategie di salvataggio e l'uso di sistemi di ventilazione forzata necessitano, quindi, di un'attenta valutazione in fase di progetto basata sulla considerazione contemporanea di differenti scenari incidentali.

Il livello di radiazione nel verso opposto a quello della ventilazione del tunnel può essere significativo, sia a causa della radiazione diretta delle fiamme sia a causa del backlayering.

Questo può notevolmente complicare le operazioni di spegnimento, impedendo o complicando l'avvicinamento al fuoco necessario ad eseguire efficaci operazioni di spegnimento.

3.7.1 Effetto della ventilazione sulla lunghezza di fiamma

Abbiamo già visto dall'esperienza di Kurioka che in gallerie con ventilazione naturale, la lunghezza di fiamma è circa la stessa lunghezza che si avrebbe in condizioni non confinate, purché la fiamma non si estenda in verticale fino a toccare il soffitto [48,49].

Quando cioè la fiamma si estende in verticale fino a toccare il soffitto sotto l'influenza di un sistema di ventilazione forzata, la lunghezza di fiamma diviene più lunga di quanto sarebbe nel caso non confinato soggetto alle stesse condizioni di ventilazione.

Inoltre è noto dagli studi di Rew e Deaves [50] che la lunghezza di fiamma, $\mathbf{L_f}$ [m], è inversamente proporzionale al valore della velocità di ventilazione longitudinale **u** [m/s]. Essi quando studiarono il progetto test EUREKA conclusero la loro ricerca con la formula:

$$L_f = 20 \cdot \left(\frac{\dot{Q}}{120000} \right) \cdot \left(\frac{u}{10} \right)^{-2/5} \tag{3.25}$$

dove **Q** è l'HRR totale del fuoco [kW].

La ragione della proporzionalità inversa, tra velocità di ventilazione longitudinale e

lunghezza di fiamma, sta nel fatto che l'incremento di velocità comporta un aumento di entrainment, il quale a sua volta ricambiando una percentuale maggiore di aria "fredda" comporta una riduzione percentuale della massa calda e dunque della lunghezza di fiamma.

3.7.2 Influenza della ventilazione sulla magnitudo

Che la ventilazione abbia un effetto sul valore di HRR e sulla velocità di crescita di un incendio è stato mostrato dagli studi di diversi ricercatori sulla base dei risultati ricavati da un gran numero di test.

Carvel *et al.* [60] hanno usato un metodo sistematico, con un approccio di tipo Bayesiano, per stimare l'effetto della ventilazione sullo sviluppo del fuoco e sull'HRR dell'incendio in un tunnel a singola canna.

Nonostante l'approccio usato da Carvel sia particolarmente interessante vista la sua abilità a produrre stime di probabilità partendo da ridotti pacchetti di informazione, può realizzarsi difficile in molti casi eseguire confronti tra test diversi.

La conclusione cui può giungersi in questa sede è che la geometria del combustibile è il fattore più importante: se tale geometria varia anche l'effetto della ventilazione sull'HRR può variare.

Ad esempio i risultati di test condotti su HGV portano alla conclusione che all'aumentare della velocità di ventilazione longitudinale corrisponde un aumento (anche sostanziale) della magnitudo dell'incendio, sia intesa in termini di HRR che in termini di tasso di crescita.

Quando, invece, gli studi di Carvel trattano i "pool fires" si giunge alla conclusione che per pozze incendiate, poco o mediamente estese, un aumento della ventilazione corrisponde ad una diminuzione di HRR. Mentre per pozze di combustibile incendiato molto estese un aumento di ventilazione può, probabilmente, incrementare l'HRR. Il limite tra le due situazioni dipende dalle caratteristiche del tunnel e dalle condizioni di ventilazione.

3.7.3 Il fenomeno della pulsazione

Un'altro fenomeno recentemente preso in considerazione anche per i tunnel è quello della pulsazione [26].

Durante gli esperimenti del 2003 condotti nel Runehamar Tunnel in Norvegia, è stato

osservato che, all'interno di un certo range di HRR (125 - 135 MW) e per una data configurazione globale, il valore del flusso dei gas in moto all'interno del tunnel può oscillare con pulsazioni regolari di grande periodo (4 - 18 secondi).

Lo studio di queste oscillazioni è stato fatto con due differenti approcci: uno di tipo acustico ed uno ad impedenza basato sull'analisi delle risposte in frequenza.

Secondo entrambi gli approcci adottati è stata trovata una coincidenza soddisfacente tra la risonanza intrinseca del sistema ed i valori di periodo misurati.

Il verificarsi di questo fenomeno in esperimenti condotti a scala reale porta a pensare che il loro effetto potrebbe essere significativo nel caso di veri incendi. Questo significa che esiste un rischio addizionale per gli occupanti del tunnel, ed in particolare per gli addetti allo spegnimento che si apprestano ad avvicinarsi al fuoco.

Diversi fattori possono influire sulla pulsazione, ma gli condotti sull'esperienza del Runehamar Tunnel mostrano che la loro natura è comunque una funzione del sistema tunnel nel suo complesso.

CAPITOLO 4

LE GALLERIE FERROVIARIE E LA SICUREZZA

4.1 INTRODUZIONE

Il progetto di ogni struttura o sistema ingegneristico più o meno complesso è il risultato della combinazione congiunta di diversi fattori/obiettivi che possono però sempre riassumersi in tre categorie: **la funzionalità** dell'opera cui l'opera stessa è riferita; **la sicurezza** che l'opera garantisce nei confronti della comunità durante la sua costruzione ed il suo esercizio; **la fattibilità tecnico-economico-ambientale** dell'opera.

Nel caso delle grandi opere questi tre fattori si combinano in modo da essere quasi inscindibili e risulta impossibile raggiungere e riassemblare i tre obiettivi su piani diversi. Ogni aspetto di progetto diviene così un tutt'uno di esigenze funzionali e di sicurezza coordinate nell'ottica della fattibilità.

Il progetto di una lunga galleria ferroviaria rientra a pieno titolo nella categoria delle grandi opere dell'ingegneria e in quanto tale non sfugge alla logica sopra accennata, risultando così, di caso in caso, funzione del caso stesso.

Si riassumono di seguito le principali caratteristiche che deve possedere un "sistema" galleria ferroviaria affinché siano raggiunti gli obiettivi ad essa attribuiti dalla comunità.

4.2 GENERALITÀ

Le gallerie ferroviarie sono dei passaggi coperti composti da uno o più tunnel ferroviari e, a seconda del sistema utilizzato per la loro costruzione, si distinguono in:

- gallerie naturali, o a foro cieco, costruite mediante scavo tubolare e successivo rivestimento;
- gallerie artificiali, o a cielo aperto, costruite scavando una trincea, rivestendola in muratura, ricoprendola con una volta e poi rinterrando lo scavo.

La galleria ferroviaria possiede uno o più binari ferroviari, disposti in uno o più fori paralleli, e viene utilizzata per il traffico ferroviario che può essere composto da traffico

passeggeri e/o da traffico merci. Ad ogni galleria sono a volte connessi altri tunnel ognuno dei quali assolve una funzione ben precisa:

- tunnel di collegamento fra le gallerie, nel caso di gallerie costruite su fori paralleli;
- tunnel di lavoro per le squadre addette alla manutenzione;
- tunnel di servizio come per esempio i tunnel di ventilazione;
- tunnel di uscita;
- tunnel per i soccorsi.

I tunnel per i soccorsi sono degli accessi che vengono utilizzati dall'equipaggio di soccorso in caso di incendio o di altre situazioni di emergenza.

I pozzi sono collegati alla galleria e vengono utilizzati per la ventilazione e l'estrazione dei fumi, ma anche come vie di uscita, di soccorso e di servizio.

La configurazione di una galleria ferroviaria può essere di diverso tipo: la scelta della tipologia dipende dall'estensione del traffico, dal progetto delle attrezzature di sicurezza, dalla sua lunghezza e dalle caratteristiche del suolo e delle rocce che essa deve attraversare.

Dal punto di vista della sicurezza, possono considerarsi fondamentalmente due macro tipologie alternative tra loro, anche se per ognuna di esse possono individuarsi ulteriori sotto-tipi:

1. **tunnel a singola canna**, a singolo o doppio binario, con vie d'uscita attraverso i portali o attraverso intersezioni trasversali appositamente previste per la sicurezza, con eventuale tunnel di servizio parallelo;
2. **tunnel a doppia canna gemellati**, con uno o due binari per canna e sviluppo parallelo, collegati tramite connessioni equipaggiate con porte antifuoco e sistemi di bloccaggio dei fumi, con eventuale tunnel di servizio parallelo.

Focalizzando l'attenzione esclusivamente sul raggiungimento degli obiettivi di sicurezza nell'eventualità di un evento accidentale più o meno grave, un'analisi superficiale di queste due macro-tipologie porterebbe ad affermare che, nel progetto di nuove infrastrutture o nella riqualificazione di infrastrutture esistenti, la tipologia dei tunnel a doppia canna è l'unica che merita attenzione, per la sua capacità di isolare il tracciato dell'incidente e fornire accessi ed uscite sicure sull'altro tracciato.

Ciò perché i tunnel a doppia canna attrezzati di frequenti collegamenti trasversali hanno evidenti ed ovvi vantaggi di sicurezza, che però hanno un notevole prezzo da pagare. Essi possiedono infatti anche delle proprietà svantaggiose che non sono ugualmente ovvie, come un elevato surplus di costi rispetto alla soluzione a singola canna e di impatto ambientale dovuto alla maggiore quantità di scavi.

L'aspetto della differenza di costo è un fattore importante nelle scelte progettuali, dato che la sicurezza è accettabile in tutte le alternative.

4.3 IL SISTEMA GALLERIA

Il **sistema tunnel** è costituito dalla galleria o dall'insieme di gallerie, soggette all'esercizio ferroviario, collegate tra loro funzionalmente e strutturalmente.

Esso comprende sia l'equipaggiamento infrastrutturale ordinario che tutte le misure di sicurezza (predisposizioni strutturali, impiantistiche e organizzative), interne o esterne ivi presenti, finalizzate all'esercizio e alla manutenzione.

La pianificazione e la progettazione delle parti strutturali di un tunnel viene effettuata considerando una vita utile di 100 anni; mentre per le strutture interne e per le apparecchiature installate si considera una vita utile di 50 anni.

Nella progettazione delle gallerie devono essere considerate tutte le misure di sviluppo della rete ferroviaria con particolare riguardo all'elettrificazione e alla velocità.

4.3.1 Elementi strutturali

Le parti strutturali esterne di una galleria sono le strutture portanti, le strutture realizzate davanti ai portali di ingresso e le strutture di rinforzo.

Per **strutture portanti** si intendono tutte le strutture del sistema portante principale della galleria che hanno un'influenza sulla capacità portante e sulla stabilità della galleria stessa.

Le **strutture ai portali** del tunnel includono tutte quelle strutture portanti per mezzo delle quali il tunnel è collegato all'ambiente esterno.

Le **strutture di rinforzo** includono tutte quelle strutture direttamente collegate alle strutture portanti e che contribuiscono alla capacità portante del tunnel.

Le **parti strutturali** interne alla galleria includono tutte le parti strutturali che non appartengono al sistema portante principale della galleria ma che devono comunque possedere una capacità portante e una certa stabilità. Le parti strutturali interne alla galleria includono, per esempio, le strutture di rivestimento quali le strutture del soffitto e delle pareti, così come l'armamento ferroviario e la sovrastruttura.

Le **strutture di rivestimento** comprendono, anche, l'impermeabilizzazione, l'isolamento termico e la protezione contro l'incendio.

Le **sottostrutture** includono tutti gli strati strutturali e qualunque attrezzatura di drenaggio situata al di sotto degli strati di sostegno del binario così come tutte le strutture di isolamento antivibrante e di isolamento termico.

La **sovrastruttura** include gli strati di supporto ed i binari ferroviari.

4.3.2 Installazioni e sistemi tecnici

Le installazioni ed i sistemi tecnici dei tunnel ferroviari includono: l'apparecchiatura di elettrificazione e di sicurezza del binario; l'apparecchiatura di ventilazione e di illuminazione; l'apparecchiatura di drenaggio; l'apparecchiatura di sicurezza, e l'apparecchiatura per il monitoraggio ed il controllo.

Il **sistema elettrico** include il sistema di elettrificazione del binario ferroviario ed i sistemi elettrici relativi alla ventilazione, al riscaldamento, alla rimozione del fumo, al drenaggio, alla distribuzione di energia, all'illuminazione e alla trasmissione dei dati per il monitoraggio delle attività e della sicurezza.

Il **sistema di ventilazione** comprende tutti i sistemi e le attrezzature per la ventilazione naturale e forzata che vengono utilizzati per l'aerazione e per la rimozione del fumo dalla galleria.

Il **sistema di illuminazione** include tutti i sistemi che vengono utilizzati sia per l'illuminazione normale che per l'illuminazione di sicurezza e di emergenza del tunnel.

Il sistema di drenaggio include la rete di tubazioni, i pozzi, i bacini e le attrezzature che servono il tunnel e che vengono utilizzati per l'accumulazione, la rimozione e il trattamento dell'acqua per il drenaggio, per lo spegnimento degli incendi, così come per la raccolta di tutti i liquidi che possono fuoriuscire dai vagoni nelle situazioni di incidenti.

Il **sistema di sicurezza** include tutti i sistemi che vengono utilizzati per garantire la sicurezza nel tunnel e che quindi assicurano un regolare funzionamento del traffico ferroviario e dei soccorsi in caso di incidente e l'impedimento di atti di vandalismo all'interno del tunnel.

Il **sistema di monitoraggio e controllo** include tutta l'apparecchiatura per verificare e controllare l'utilizzo della galleria e l'impiego delle attrezzature.

4.4 IL PROGETTO DELLA SEZIONE

RFI (Rete Ferroviaria Italiana) è la società che gestisce l'intera rete infrastrutturale del Gruppo FS (Ferrovie dello Stato) e garantisce la sicurezza della circolazione ferroviaria sull'intera rete, sviluppando le tecnologie dei sistemi e dei materiali ed assicurando il mantenimento in efficienza della rete stessa.

RFI è stata costituita il 1° luglio 2001, a conclusione del processo di riorganizzazione del Gruppo Ferrovie dello Stato iniziato, per rispondere alle Direttive comunitarie, nel 1998 con l'istituzione della Divisione Infrastruttura e proseguito con la costituzione della società TRENITALIA il 1° giugno 2000.

La Società RFI ha redatto, nel 2002, il "Manuale progettazione gallerie" che costituisce una documentazione di riferimento nell'attività di progettazione delle gallerie ferroviarie italiane. Il manuale fa parte della sezione II del documento "Prescrizioni tecniche per la progettazione esecutiva".

Nel manuale vengono specificati tutti gli elaborati che bisogna predisporre a seconda del livello progettuale che si intende raggiungere (preliminare, definitivo, esecutivo).

Le indicazioni presenti nel manuale vengono applicate per la progettazione di gallerie nuove sia naturali che artificiali.

4.4.1 Standard di riferimento progettuali del gruppo FS

Gli standard di riferimento per la definizione delle **sezioni tipo** (Figura 4.1 - Figura 4.2) di gallerie naturali ed artificiali vengono definiti in funzione della velocità di progetto, del tracciato e del tipo di alimentazione elettrica. Le gallerie, al loro interno, sono provviste di nicchie, nicchioni e camere di deposito.

Le nicchie, adibite al ricovero del personale della manutenzione, devono avere un interasse di circa 25 m senza, però, superare i 30 m; devono possedere una larghezza di 2,40 m, un'altezza di 2,20 m ed una profondità di 0,80 m (Figura 4.3).

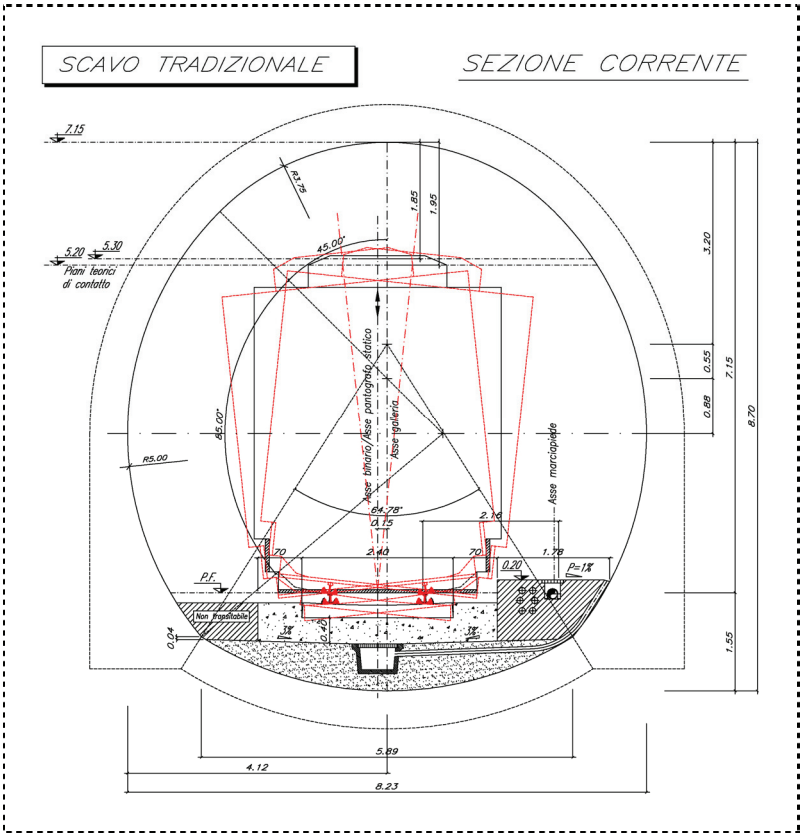

Figura 4.1 - Sezione tipo di una galleria naturale a singolo binario per tratte aventi velocità di percorrenza minore di 250 Km/h.

Nel caso di gallerie a doppio binario, le nicchie vengono realizzate affacciate tra loro, nel caso di gallerie a semplice binario sono invece disposte tutte sullo stesso lato. Il piano di calpestio deve avere una pendenza dell'1% verso l'interno della galleria. Nel caso di gallerie superiori a 2 km, le nicchie devono essere attrezzate con armadietti distinti per il contenimento di mascherine, di torce a vento, di telefonia fissa posta in scatole stagne a distanza minore o uguale a 500 m, di citofoni a distanza minore o uguale a 250 m e del sistema idrante, che non deve trovarsi mai in corrispondenza di nicchie con quadri elettrici.

I nicchioni devono essere costruiti ad una distanza non superiore a 250 m se le nicchie hanno un interasse di 25 m oppure ad una distanza non superiore a 240 m se le nicchie hanno un interasse di 30 m; devono possedere una larghezza di 2,80 m per una profondità di 3,30 m o 4,10 m, ed un'altezza di 2,20 m (Figura 4.4). Il piano di calpestio deve avere una pendenza dell'1% verso l'interno della galleria.

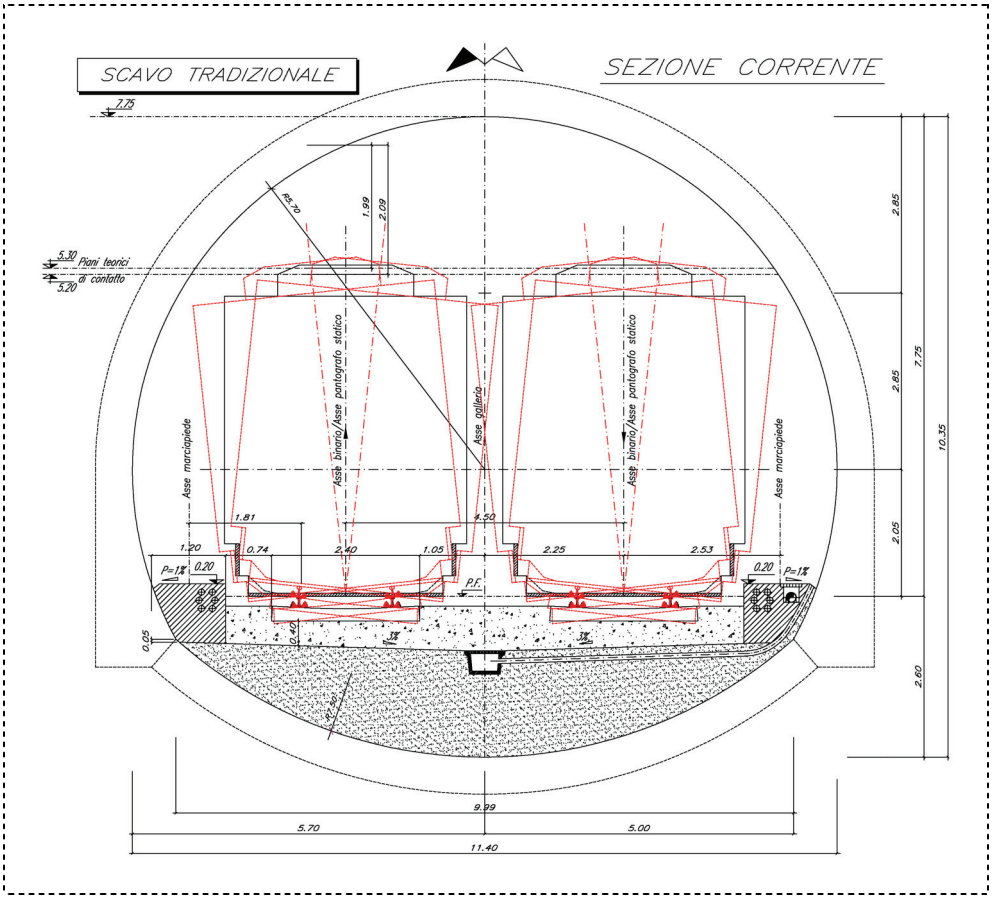

Figura 4.2 - Sezione tipo di una galleria naturale a doppio binario per tratte aventi velocità di percorrenza minore di 250 Km/h.

Le camere di deposito vengono realizzate nel caso di tunnel superiori ai 2 km se richieste dal committente ed hanno una distanza che solitamente varia fra 1 e 1,5 km. Le camere hanno una lunghezza di 12 m, una sezione ad ovoide con larghezza di 3,80 m alla

base e altezza di 4,50 m alla chiave (Figura 4.5). Le camere di deposito vengono utilizzate per il deposito di materiali, apparecchiature meccaniche, etc..

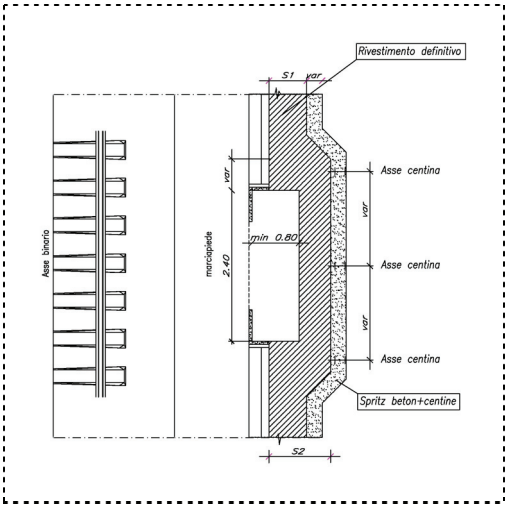

Figura 4.3 - Pianta di una nicchia.

Per quanto riguarda la scelta dello schema di configurazione delle gallerie, il progettista, fino a 1000 m, potrà scegliere di realizzare gallerie a singolo foro e doppio binario o gallerie a doppio foro e singolo binario; per gallerie comprese fra 1000 e 2000 m potrà scegliere se realizzare la galleria a singolo o a doppio foro con la raccomandazione di preferire la soluzione a doppio foro; per gallerie di lunghezza superiore a 2000 m dovrà prevedere la soluzione a doppio foro.

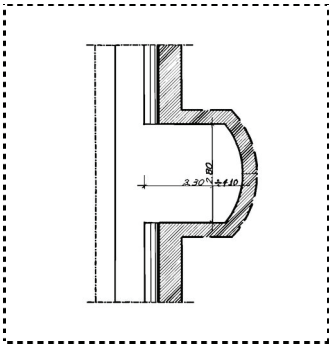

Figura 4.4 - Pianta di un nicchione.

Il progettista dovrà inoltre prevedere, nelle gallerie a doppio foro, dei collegamenti trasversali. Tali collegamenti dovranno avere delle dimensioni adeguate e dovranno essere realizzati in modo da impedire la presenza di fumo.

Gli impianti di segnalamento dovranno impedire il sopraggiungere di treni in caso di allarme e dovrà essere possibile aprire la porta di comunicazione con la galleria attigua solo se il treno è stato bloccato o ha impegnato la relativa sezione di blocco a velocità ridotta in modo da non costituire pericolo per le persone.

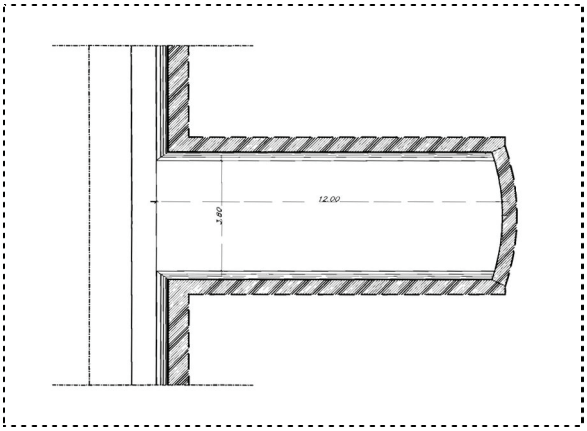

Figura 4.5 - Pianta di una camera di deposito.

Il collegamento trasversale deve essere dimensionato per accogliere almeno 300 persone, e deve svilupparsi preferibilmente in lunghezza. Se ciò non è possibile dovrà svilupparsi in altezza su due livelli con altezze non inferiori a 2,20 m; il piano di calpestio deve avere una pendenza dell'1% verso l'interno della galleria.

4.5 IL PROGETTO DEGLI IMPIANTI

Vengono adesso definiti i criteri progettuali per la realizzazione dell'impianto idrico antincendio, dell'impianto d'alimentazione elettrica e d'illuminazione, dell'impianto di telecomunicazione e del sistema di supervisione degli impianti.

Il principio con cui vengono realizzati questi impianti, che mirano alla sicurezza delle persone, è quello di garantire una elevata disponibilità della loro funzionalità a fronte di un

singolo guasto o della perdita di una o più parti durante la fase di emergenza.

4.5.1 Impianto idrico antincendio

La funzione dell'impianto idrico antincendio è quella di poter garantire ai Vigili del Fuoco, nella zone del sinistro, una portata d'acqua ed una pressione idonea al funzionamento contemporaneo di tre rubinetti idranti antincendio.

L'impianto idrico è costituito da vasche e serbatoi per l'accumulo di acqua, dall'impianto per il riempimento della condotta e per la successiva pressurizzazione, da una rete idrica antincendio, da rubinetti idranti UNI 45, da accessori e valvolame.

Le vasche o serbatoi di accumulo dell'acqua vengono di norma posti ad ogni imbocco della galleria . Ogni vasca deve essere dimensionata in modo tale da garantire il quantitativo di acqua necessaria al riempimento di tutta la condotta e al funzionamento contemporaneo di tre rubinetti idranti per almeno 30 minuti.

L'impianto di pressurizzazione viene realizzato dai Vigili del fuoco mentre le FS devono assicurare il riempimento della rete idrica antincendio in breve tempo. A tal proposito vengono previste delle pompe garantendone anche l'alimentazione elettrica.

La rete idrica antincendio è composta da una condotta di adduzione primaria e dalle tubazioni di alimentazione dei rubinetti idranti. Il diametro nominale della condotta primaria non dovrà mai essere inferiore a tre pollici. La condotta primaria collega le due vasche poste agli imbocchi. Sia la condotta primaria che le tubazioni di alimentazione degli idranti dovranno essere realizzate con tubazioni in acciaio zincato con estremità lisce rispondenti alle norme UNI 6363.

I rubinetti idranti UNI 45 devono essere contenuti in cassette antincendio in lamiera poste ad un'altezza minima di 70 cm dal piano di camminamento o in nicchie ricavate nella muratura e chiusi con sportelli in alluminio e vetro.

Gli accessori e valvolame dovranno essere idonei a sopportare le pressioni che si vengono a generare, protetti o resistenti al fuoco.

4.5.2 Impianto elettrico e di illuminazione

L'impianto di alimentazione deve garantire il corretto funzionamento degli impianti di

illuminazione delle vie d'esodo all'interno della galleria e dei piazzali esterni posti agli imbocchi, dell'impianto di alimentazione delle prese all'interno della galleria e dei piazzali esterni nonché dell'impianto di diffusione sonora, telefonico, di radiopropagazione e idrico. Nel caso di gallerie dotate di finestre intermedie (gallerie laterali che mettono in comunicazione un punto intermedio della galleria ferroviaria con l'esterno, solitamente attrezzate in modo tale da poter essere utilizzate sia per il soccorso in caso di incidente in galleria che come vie d'esodo) in cui è previsto l'impianto di ventilazione, si dovrà garantire anche l'alimentazione di tale impianto.

L'impianto deve essere costituito da due sistemi diversi di distribuzione posti all'esterno della galleria che alimentano due dorsali d'alimentazione a 1000 V posti all'interno della galleria. Dette dorsali alimenteranno una serie di quadri elettrici (quadri di tratta) che saranno ubicati nelle nicchie e nei nicchioni ogni 250 m circa su entrambi i lati della galleria se a doppio binario o su un lato solo se la galleria è a semplice binario. L'impianto deve essere interfacciato da un sistema di controllo, gestione e diagnostica degli impianti LFM (luce e forza motrice) in galleria che consenta di gestire la riconfigurazione dell'impianto in caso di guasto o di mancanza di una fonte di alimentazione.

L'alimentazione dell'impianto dovrà generalmente avvenire da due diversi sistemi primari di distribuzione fra loro fisicamente distanti in modo che sia automaticamente assicurata l'alimentazione di tutti i quadri di tratta, dei piazzali esterni e delle altre utenze anche se dovesse venire a mancare una della due fonti di alimentazione. In base alle fonti d'alimentazione disponibili dovranno essere realizzati appositi posti di trasformazione situati agli imbocchi della galleria. Nel caso in cui è disponibile una sola fonte primaria si potrà prevedere l'utilizzo del gruppo elettrogeno come alimentazione di riserva.

Le dorsali di distribuzione dell'energia a 1000 V che alimentano i singoli utilizzatori devono essere realizzati con linea in cavo (normale trifase + neutro). La dimensione dei cavi deve essere tale da contenere le cadute di tensione entro l'8%; inoltre devono essere isolati in guaine non propaganti l'incendio e a ridotta emissione di fumi, gas tossici e corrosivi.

I quadri di tratta vengono collocati ogni 250 m circa all'interno di ciascun nicchione fissandoli alla parete o a terra. Se all'interno della galleria non ci sono nicchioni, i quadri di tratta possono essere posizionati all'interno delle nicchie. In ciascun quadro oltre alle apparecchiature di protezione e controllo trovano posto un trasformatore abbassatore di tensione, due prese interbloccate per l'illuminazione di emergenza, il sistema di rilevazione ed estinzione automatica dell'incendio, il gruppo di continuità monofase tipo on-line per

servizio continuo. Il gruppo di continuità (UPS) deve fornire un'alimentazione a corrente alternata di alta qualità per apparecchiature elettroniche sensibili con un'autonomia di dieci minuti per tutti gli apparati di configurazione e monitoraggio. Il fattore di contemporaneità dell'illuminazione di emergenza è pari a 4 kW distribuito su due quadri di tratta. Le lampade di riferimento e di illuminazione devono essere dotate di apposite protezioni in modo da impedire che eventuali guasti possano ripercuotersi sulla linea destinata ad alimentare le lampade d'illuminazione delle vie d'esodo.

Tutti gli apparecchi illuminanti devono essere posti a 2 metri di altezza dal piano di calpestio e ad ogni 15 metri. Le lampade costituenti l'impianto di illuminazione delle vie d'esodo devono potersi accendere da postazione remota e da postazione locale sia agli imbocchi della galleria che all'interno della stessa. Appositi pulsanti, posti ogni 125 m su entrambi i lati della galleria se a doppio binario o su un lato solo se la galleria è a semplice binario, consentiranno l'accensione di tutte le lampade d'illuminazione delle vie d'esodo. I pulsanti devono essere collocati ad 1 m di altezza dal piano di calpestio e dotati di led di segnalazione di colore blu per una facile individuazione al buio.

I piazzali di emergenza situati agli imbocchi della galleria devono risultare illuminati e dotati di prese per eventuali mezzi ausiliari che necessitano di energia elettrica.

Nella zona dove sarà individuata la piazzola per l'atterraggio degli elicotteri di soccorso dovrà essere prevista un'idonea illuminazione.

Quanto finora detto relativamente all'impianto elettrico e di illuminazione è valido per gallerie ferroviarie di lunghezza compresa fra 5 e 20 km.

4.5.3 Impianto di telecomunicazione

Gli impianti di telecomunicazione hanno la funzione di garantire un'alta disponibilità dei servizi di telecomunicazione principalmente per la comunicazioni di servizio tra gli operatori di terra e di bordo della circolazione treni, tra gli operatori delle squadre di soccorso e tra questi e il centro operativo di coordinamento dell'emergenza, da e verso i viaggiatori. Ogni galleria dovrà essere attrezzata con i sistemi di telefonia selettiva FS, di radiopropagazione per l'estensione della telefonia cellulare FS, di telefonia di emergenza e con l'impianto di diffusione sonora.

I circuiti telefonici selettivi in galleria dovranno essere realizzati considerando che

bisognerà installare un telefono in cassa stagna per ciascun binario ad entrambi gli imbocchi della galleria, e un telefono in cassa stagna all'interno della galleria per ciascun binario ogni 500 m, posizionando i telefoni di un binario frontalmente a quelli dell'altro binario.

L'impianto di radiopropagazione dovrà garantire all'interno della galleria e nelle aree relative agli imbocchi e agli eventuali corridoi d'esodo, l'accesso ai sistemi radio 900 MHz della rete virtuale FS e l'accesso ai canali di comunicazioni per l'emergenza nella banda 450 MHz.

La telefonia di emergenza e l'impianto di diffusione sonora sono due sistemi indipendenti ma strettamente interconnessi. L'impianto deve rendere disponibile sia al pubblico che al personale di servizio il collegamento telefonico fra postazioni microfoniche "viva-voce", dislocate lungo la galleria e ai relativi imbocchi, ed una o più consolle telefoniche. L'impianto deve inoltre consentire, in caso di emergenze o di anomalie che si verificassero durante l'esercizio ferroviario, di comunicare ai viaggiatori le istruzioni necessarie a supportare e facilitare le eventuali operazioni di soccorso.

L'impianto è costituito dalle apparecchiature di galleria e dalle postazioni telefoniche centralizzate.

Le apparecchiature di galleria sono costituite dai diffusori acustici opportunamente dislocati lungo la galleria e nelle aree di soccorso ubicate agli imbocchi; dai posti microfonici costituiti da telefoni a viva-voce installati agli imbocchi delle gallerie, negli eventuali corridoi d'esodo e lungo la galleria ogni 250 m, posizionando i telefoni di un binario frontalmente a quelli dell'altro binario; dagli alimentatori; da eventuali batterie; dagli amplificatori di potenza che pilotano i diffusori; dai cavi di alimentazione e di diffusione sonora; dagli apparati per l'inserzione della linea di diffusione sonora, per l'interfaccia verso il posto centrale, per la diagnostica, per il comando di accensione e spegnimento dell'amplificatore di potenza, per la regolazione del segnale in ingresso all'amplificatore di potenza.

Le postazioni telefoniche centralizzate sono costituite dalle consolle che consentono l'ascolto in altoparlante dei messaggi diffusi in galleria e dovranno essere dotate di dispositivo che permetta il funzionamento in viva-voce per le comunicazioni telefoniche; dall'apparato con schede di interfaccia di linea per la gestione delle segnalazioni e della fonia, e dal terminale che visualizza su monitor tutte le segnalazioni entranti e, tramite tastiera e mouse, permette di inviare le segnalazioni uscenti; dall'interfaccia telefonica che permette le conversazioni fra le postazioni periferiche e l'operatore di consolle;

dall'interfaccia con l'impianto di diffusione sonora; dall'interfaccia verso periferiche locali; dagli apparati di interfaccia per le funzioni di telecontrollo e telediagnostica degli impianti e verso il sistema di supervisione.

L'apparecchio telefonico a viva-voce per l'emergenza presenta sulla parte frontale due dispositivi di richiesta di connessione, il primo consiste in un pulsante a fungo che permette ad un utente, che non sia personale FS, di effettuare una richiesta di conversazione con l'operatore della consolle abilitata, pigiando semplicemente il tasto stesso, il secondo consiste in un interruttore a due posizioni, a chiave FS in dotazione al personale viaggiante, che permette al personale FS di effettuare una richiesta di conversazione con l'operatore della consolle o di inserirsi nell'impianto di diffusione sonora per effettuare annunci all'interno della galleria. All'operatore della consolle attiva, in tutti i casi, sarà inviato automaticamente un codice identificativo della richiesta di conversazione avvenuta tramite pulsante o chiave FS, individuando il telefono a viva-voce di provenienza della richiesta.

I diffusori sono del tipo a tromba e vengono installati a coppie contrapposte, in via indicativa, ogni 30 m su entrambi i lati della galleria ad un'altezza di 2,5 m dal piano del ferro.

Tutti i sistemi di telecomunicazione dovranno essere costantemente alimentati e dovranno essere previste alimentazioni di riserva centralizzate. Si dovrà prevedere per tutti i sistemi di telecomunicazione un'autonomia di funzionamento in caso di mancanza dell'alimentazione principale non inferiore a due ore.

4.5.4 Sistema di supervisione degli impianti

Il sistema di supervisione degli impianti ha lo scopo di diagnosticare e controllare gli impianti realizzati in galleria, dovrà quindi interfacciarsi ai vari sottosistemi per acquisire i dati opportuni relativi allo stato di funzionamento e per attuare i comandi necessari per la gestione degli impianti, sia in condizioni normali e di manutenzione, sia in condizioni di emergenza.

Il sistema è essenzialmente costituito da una postazione locale (PL) da cui è possibile gestire e diagnosticare tutti gli impianti, ubicati in un locale adiacente la galleria, da due centrali (Master/Slave) per la riconfigurazione automatica del sistema di alimentazione, ubicate agli estremi della galleria, e dai moduli locali (ML) per interfacciarsi con le apparecchiature lato campo, ubicati in ciascun quadro di tratta. Il sistema comprenderà

anche una postazione di supervisione che sarà ubicata in un luogo distante dalla galleria e da cui sarà possibile gestire e diagnosticare tutti gli impianti come dalla postazione locale. Il sistema dovrà inoltre segnalare lo scatto di eventuali allarmi antintrusione e antincendio nei locali tecnici dei piazzali e degli allarmi antincendio dei quadri di tratta.

4.6 INFLUENZA DELLE DIVERSE TIPOLOGIE DI TUNNEL SULLA SICUREZZA

Non è affatto immediato comprendere quale tipologia è in grado di fornire le condizioni migliori per la sicurezza nei differenti scenari incidentali che possono sempre verificarsi.

Con riferimento alla totalità delle tipologie esistenti, siano esse di gallerie in fase di progetto, realizzazione o di esercizio, è importante effettuare una distinzione dettagliata di ogni caso poiché, con particolare riferimento agli scenari derivanti da un incendio, ogni tipologia presenta aspetti differenti a cui corrispondono strategie di esercizio e di intervento differenti e sulle quali è opportuno porre l'attenzione.

Entrando nel dettaglio del sistema galleria, dalle due macro-tipologie individuate in precedenza possono derivarsi i seguenti sotto-tipi o concetti:

- tunnel a singola canna e singolo binario;
- tunnel a singola canna e singolo binario dotati di segnali di blocco;
- tunnel a singola canna e doppio binario;
- tunnel a doppia canna gemellati;
- tunnel a singola o doppia canna con tunnel di servizio.

4.6.1 Tunnel a singola canna e singolo binario

Questo concetto di tunnel è quello tradizionale a singolo binario, normalmente senza installazioni tecniche speciali per segnalare il traffico all'interno del tunnel, eccetto quelle strettamente necessarie all'esercizio della linea. In queste gallerie è presente un solo treno per volta poiché non è installato alcun segnale di blocco al suo interno. Per cui una volta imboccata la galleria nessuna procedura impedisce al treno di correre verso l'uscita. In altre parole la galleria intera è compresa all'interno della medesima sezione di blocco e non esistono circuiti di binario per il blocco elettrico. Ciò è ancora un fatto comune nelle linee a bassa potenzialità.

In queste circostanze, è la direzione del traffico a determinare la direzione di ventilazione nel tunnel, almeno finché è presente un solo treno in moto. Se un treno, per qualsiasi ragione dovesse fermarsi all'interno del tunnel, il flusso d'aria decrescerà rapidamente a causa della diminuzione di velocità del treno e la direzione di ventilazione può subire una inversione, in funzione della topografia e della temperatura all'interno ed all'esterno della galleria. Un eventuale incendio può contribuire a cambiare la direzione di ventilazione.

4.6.2 Tunnel a singola canna e singolo binario con segnali di blocco

Questi tunnel sono in linea di principio uguali ai tunnel descritti al paragrafo precedente, escluso che per la presenza di sistemi di controllo verticali o di circuiti di binario tali da consentire al loro interno la presenza contemporanea di più treni.

Sono dunque presenti segnali di controllo che possono causare la temporanea sosta di un treno all'interno della galleria. Possono così essere dotate di stazioni per l'incrocio o il sorpasso in funzione dell'esercizio della linea.

La direzione di ventilazione può essere imprevedibile se esiste la possibilità di avere contemporaneamente treni in moto in direzioni diverse. Quando un treno percorre il tunnel, può accadere che il campo di flusso cambi rapidamente.

In caso di un incidente, coordinare il movimento di più treni presenti è un lavoro che richiede procedure complesse e tempi elevati, ma in ogni caso solo un treno sarà presente all'interno della medesima sezione di blocco.

4.6.3 Tunnel a singola canna e doppio binario

In questo caso ambo i binari sono localizzati nella stessa canna. Nel caso in cui il tunnel debba prevalentemente scavarsi nella roccia questa è indubbiamente la soluzione più economica laddove l'esercizio prevede il doppio binario, infatti questo concetto rappresenta lo standard di molti paesi.

In generale l'area della sezione trasversale è abbastanza grande (80 ÷ 115 m^2 per tunnel nuovi) da contenere grandi volumi di aria nella parte superiore della galleria. Nel caso delle metropolitane si hanno invece, generalmente, sezioni trasversali più piccole. Questo tipo di configurazione fornisce buone ed economiche opportunità per l'installazione di collegamenti tra i due binari.

I binari sono normalmente dotati di più sezioni di blocco per consentire il transito sequenziale di più treni e, nei tunnel più lunghi, gli scambi o i deviatoi possono essere frequenti. Ci sarà normalmente più di un treno nel tunnel e se si verifica la necessità di un'evacuazione immediata è importante, in primo luogo inibire il traffico, sull'altro binario[8].

La direzione di ventilazione è ancora imprevedibile se sono in transito diversi treni, ma il tunnel possiede un'estensione tale da permettere una buona stratificazione dei fumi durante le prime fasi di un incendio.

4.6.4 Tunnel a doppia canna gemellati

In questo tipo di configurazione sono presenti due canne parallele, una per ogni binario, con la possibilità di avere collegamenti trasversali e vie di fuga tra i tubi lungo tutta la loro estensione. Questo concetto di tunnel è particolarmente appropriato per i tunnel molto lunghi (15 ÷ 20 km), nei quali non esistono economiche possibilità per la realizzazione di vie di fuga alternative verso l'esterno.

Tuttavia questa configurazione può risultare una soluzione economica anche nel caso dei piccoli tunnel poiché le differenze di costo potrebbero essere minime in riferimento a particolari problemi nella realizzazione di gallerie a singola canna con doppio binario.

E' ovvio che questa soluzione può essere adottata in tutti quei casi in cui le potenzialità della tratta richiedono un doppio binario, ma quasi sempre non sarà un costo soluzione effettiva, ovvero quasi sempre non sarà la soluzione più economica a parità di livello di sicurezza.

I binari saranno dotati di stazioni di blocco per consentire il transito simultaneo di più treni sullo stesso binario e, nei tunnel più lunghi, potrebbero essere necessari uno o più collegamenti trasversali. La direzione di ventilazione in ogni canna sarà prevedibile e data dal traffico.

L'area della sezione trasversale in ogni foro è sostanzialmente più piccola di quella che

---

[8] La prima operazione che esegue il capotreno, o chi per lui, nel caso si prospetti l'eventualità di una evacuazione, è quella di scendere dal treno per porre in corto circuito gli altri binari attraverso l'appoggio di una barra metallica opportunamente configurata. Questa operazione è nota in gergo con il termine "shuntare".

si avrebbe con un doppio binario su un'unica canna, e un eventuale produzione di fumo farà si che esso occupi molto rapidamente la parte più alta del tunnel. Questo può essere un elemento importante per la valutazione della sicurezza.

Figura 4.6 - Collegamenti tra i due tubi nella galleria del Faido.

Tunnel di questo tipo sono presenti sulla tratta ad alta velocità nei Paesi Bassi da Amsterdam ad Antwerpen, in Svezia ed in altri paesi europei. Anche i tunnel in costruzione sulle Alpi saranno di questo tipo. Nel caso dei tunnel stradali questa tipologia è in genere la più comune nei tratti ad elevato volume di traffico.

4.6.5 Tunnel a singola o doppia canna con tunnel di servizio

Per tunnel lunghi che si estendono sotto grandi masse d'acqua o sotto il massiccio di una montagna, con un elevato livello di traffico può essere difficile assicurare l'accesso al

tunnel lungo tutto il suo sviluppo. In tali tunnel può essere conveniente valutare la realizzazione di un tunnel di servizio separato per le operazioni e le attività di manutenzione e per l'evacuazione in caso d'incidente.

Il concetto di tunnel di servizio è spesso combinato con tunnel a traffico separato per ogni direzione (come per il tunnel sotto la Manica), ma esistono anche esempi di tunnel di servizio realizzati a margine di gallerie a doppio binario. Il tunnel sottomarino del Seikantunnel in Giappone è di questo tipo.

Il concetto di tunnel di servizio possiede ovvi vantaggi riguardo alla sicurezza per l'evacuazione e per i processi di manutenzione e verifica delle attrezzature, ma ciò implica, come già accennato, un considerevole aumento dei costi.

4.7 MODALITÀ OPERATIVE PER IL MIGLIORAMENTO DELLA SICUREZZA

Nel 1997 RFI ha redatto un codice di autoregolamentazione per la sicurezza nelle lunghe gallerie ferroviarie che è sfociato nell'emissione delle "Linee guida per il miglioramento della sicurezza nelle gallerie ferroviarie", sviluppato in collaborazione con il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, per gallerie superiori ai 5 km.

In questo documento sono contenute le linee guida per l'individuazione di idonee misure di sicurezza, da osservarsi in fase progettuale e gestionale, preliminari alla costruzione di nuove infrastrutture e per l'adeguamento di quelle esistenti, dirette a salvaguardare l'incolumità delle persone dai rischi di incidenti all'interno di gallerie ferroviarie ed in particolare dagli incendi.

Il campo di validità di queste linee guida riguarda le gallerie aventi lunghezza superiore a 5 km e inferiore a 20 km. Le sezioni trattate in questo documento riguardano l'accessibilità esterna, l'accessibilità interna, i piani di emergenza; mentre per le nuove gallerie è stato introdotto un ulteriore punto nel quale sono stati definiti anche alcuni parametri progettuali.

Attualmente tale regolamento è in fase di aggiornamento alla luce della nuova normativa di settore e in particolare del Decreto Ministeriale 28/10/2005 di cui si dirà più avanti.

4.7.1 Il miglioramento della sicurezza per le gallerie esistenti

Per quanto riguarda l'accessibilità esterna, l'obiettivo è quello di realizzare le condizioni

che permettano alle squadre di soccorso di raggiungere con tutti i mezzi di soccorso e nel più breve tempo possibile gli imbocchi della galleria e di poter usufruire di spazi adeguati ed attrezzati per il posizionamento dei mezzi e delle attrezzature. Il successo dell'intervento è legato essenzialmente a due fattori: il tempo di intervento e l'efficacia.

Le vie di accesso per i mezzi di soccorso sono costituite dai cancelli di accesso e dalle strade di accesso.

L'area adiacente all'infrastruttura ferroviaria è in genere delimitata da una recinzione che viene opportunamente aperta al fine di consentire l'ingresso alle squadre di soccorso. Tale apertura viene definita cancello di accesso, ha una larghezza non inferiore ai 4 m ed è collegata alla viabilità ordinaria.

La strada di accesso dovrà avere una larghezza non inferiore ai 4 m con degli ampliamenti a 6 m ogni 250 m per permettere l'incrocio con i mezzi di soccorso, la pendenza dovrà essere inferiore al 16%, e il raggio di curvatura maggiore o uguale a 11 m.

Le vie di accesso così conformate dovranno sfociare in una zona attrezzata per il posizionamento dei vari mezzi, questa zona costituisce il piazzale di emergenza. Tale piazzale dovrà avere una superficie non inferiore ai 300 m^2, un piano a raso con lunghezza non inferiore ai 20 m per il posizionamento del mezzo bimodale, la possibilità di illuminazione per gli interventi nelle ore notturne, il rifornimento idrico per la necessità di estinzione di eventuali incendi attraverso una vasca di accumulo di 40 m^3 o, nel caso in cui non è possibile realizzarla, dovrà essere assicurata la presenza di una cisterna anche mobile di 25 m^3. All'interno del piazzale, inoltre, dovrà essere individuata una zona idonea all'atterraggio avente una dimensione minima in pianta tale che, a seconda dell'aeromobile di cui si prevede l'impiego, sia rispettato il rapporto tra il diametro della piazzola e la distanza massima tra i punti estremi dell'aeromobile con i rotori in moto, che dovrà essere pari a 1,5.

Al problema dell'accessibilità interna sono, invece, legate tutte le difficoltà della conduzione dell'intervento in ordine alla visibilità, alla respirabilità, all'evacuazione delle persone, alle comunicazioni, all'illuminazione, etc.

In relazione ai mezzi di soccorso possiamo distinguere il mezzo bimodale dei vigili del fuoco che sarà impiegato nel normale soccorso e avrà una serie di dotazioni che ne permettono l'utilizzo in galleria anche in presenza di fumi o gas tossici; il mezzo per il personale FS per il trasporto della squadra di primo intervento dello stesso personale fornito

di carrelli contenenti 10 estintori portatili e un congruo numero di autorespiratori, questi mezzi possono essere utilizzati anche per l'evacuazione delle persone coinvolte nell'incidente; infine altri mezzi di soccorso in base alle diverse necessità.

La visibilità interna viene affidata all'illuminazione delle vie d'esodo e all'illuminazione di emergenza.

In caso di incendio il fumo tende a stratificarsi dall'alto verso il basso quindi verrà realizzata una linea d'illuminazione delle vie di esodo posta ad un'altezza non superiore ai 2 m e tale da determinare un illuminamento di 5 lux a 100 cm di altezza dal piano di calpestio della via d'esodo. All'interno delle nicchie e dei nicchioni, inoltre, dovranno trovarsi delle lampade portatili utilizzabili.

L'illuminazione di emergenza comprende sia i dispositivi fissi, che avranno particolari caratteristiche per posizionamento e intensità, che una serie di dispositivi portatili.

Le misure minime previste da adottare riguardano le vie d'esodo e i cartelli segnalatori.

Per quanto riguarda le vie d'esodo queste saranno costituite dagli stradelli già esistenti per la manutenzione, la cui larghezza risulta mediamente di 50 cm. Il camminamento dovrà essere realizzato in calcestruzzo gettato in opera e dovrà essere antiscivolo.

Al fine di agevolare l'evacuazione delle persone andranno posti, di norma, almeno ogni 100 m una serie di cartelli segnalatori riflettenti e luminescenti che indichino la distanza ed il verso delle uscite più vicine, l'ubicazione degli impianti telefonici e degli attacchi idrici.

Le comunicazioni ordinarie e di emergenza prevedono i sistemi di informazione dei viaggiatori e i sistemi di comunicazione di servizio.

I sistemi di informazione dei viaggiatori sono costituiti dall'impianto di diffusione sonora che verrà utilizzato in caso di necessità dal personale delle FS e dalle squadre di soccorso.

I sistemi di comunicazione di servizio sono costituiti dai telefoni posti all'interno della galleria ogni 500 m. E' già stato previsto dalle FS un piano per dotare le gallerie ferroviarie nazionali di un dispositivo che consentirà la comunicazione a mezzo di telefoni cellulari.

In riferimento all'evacuazione dei fumi, sulla base dei risultati condotti a livello internazionale, non appare percorribile l'ipotesi di una ventilazione longitudinale, in quanto i parametri in gioco sono molteplici e di difficile governabilità. L'utilizzo di camini esistenti, per contro, non fornisce adeguate garanzie per l'evacuazione dei fumi risultando di fatto non adeguato alla scopo.

Fatte le opportune valutazioni sarà di norma realizzato all'interno delle gallerie un impianto idrico antincendio a secco le cui caratteristiche idrauliche devono essere tali da garantire alla bocca, in posizione idraulicamente più sfavorevole una portata di 200 l/min.

Per ciascuna infrastruttura ferroviaria viene approntato un piano di emergenza a partire dagli scenari di rischio ipotizzati al fine di raggiungere un livello di sicurezza adeguato. Il personale responsabile dell'attivazione del piano deve essere messo in condizione di conoscerlo perfettamente anche attraverso fasi specifiche di addestramento.

4.7.2 Il miglioramento della sicurezza per nuove gallerie

In relazione ai criteri di progettazione delle gallerie vengono definiti i parametri relativi alle tipologie costruttive, alle strutture e ai materiali, alle vie d'esodo, al percorso di emergenza, alla segnaletica di emergenza, alle comunicazioni, all'evacuazione dei fumi, all'impianto idrico antincendio, alle fonti di energia per gli impianti elettrici di emergenza e agli impianti di illuminazione di sicurezza.

Le vie d'esodo possono essere di due tipi: per le gallerie in cui non è previsto un tunnel di servizio devono essere realizzati dei percorsi protetti che portano direttamente all'esterno; mentre per le gallerie dotate di tunnel di servizio andranno previsti opportuni collegamenti per garantire la tenuta al fumo e alle fiamme.

In tutte le gallerie, indipendentemente dalla tipologia costruttiva, devono essere realizzate delle banchine di servizio, una per ogni lato nelle gallerie a doppio binario, utilizzabili anche come percorsi di emergenza per l'evacuazione delle persone. Le banchine devono avere, di norma, larghezza minima pari a 85 cm. La massima distanza percorribile in banchina per raggiungere un luogo sicuro o un accesso ad un percorso protetto non dovrà essere di norma superiore a 2000 m.

La segnaletica di emergenza sarà costituita da cartelli indicatori di tipo riflettente o luminescente per fornire le necessarie indicazioni in caso di emergenza. Il materiale costituente dovrà essere di classe 0 di reazione al fuoco.

In caso di necessità deve essere possibile dare le necessarie disposizioni al pubblico tramite opportuni impianti. Tali sistemi di comunicazione devono garantire l'efficacia di funzionamento nel tempo e pertanto andranno adeguatamente controllati e mantenuti.

In relazione agli sviluppi delle conoscenze e della tecnologia andranno studiate

opportune misure per l'evacuazione dei fumi in galleria e nelle vie d'esodo in caso di incendio.

Fatte le opportune valutazioni sarà di norma realizzato all'interno delle gallerie un impianto idrico antincendio a secco le cui caratteristiche idrauliche devono essere tali da garantire alla bocca, in posizione idraulicamente più sfavorevole una portata di 200 l/min.

Le fonti di energia di emergenza sono costituite da una batteria di accumulatori dotati di ricarica automatica e inverter, la relativa autonomia non deve essere inferiore a due ore, se il sistema non è accoppiato ad un gruppo elettrogeno, e da un gruppo elettrogeno con avviamento automatico. Le batterie e i gruppi elettrogeni devono essere installati in locali ubicati in zone non soggette a rischi di incendio ed adeguatamente ventilati.

Nelle gallerie, oltre all'impianto di illuminazione ordinaria, deve essere installato un impianto di illuminazione di sicurezza che consenta un livello di illuminazione di 5 lux a 100 cm dal piano di calpestio. I cavi devono essere racchiusi in tubazioni a se stanti adeguatamente protetti dall'acqua e dal calore oppure in manufatti resistenti all'incendio.

Per quanto riguarda l'accessibilità esterna vale quanto detto al paragrafo precedente per il miglioramento della sicurezza nelle gallerie esistenti ad eccezione del fatto che il cancello di accesso dovrà avere una larghezza non inferiore a 6,00 m, la strada di accesso dovrà anch'essa avere una larghezza non inferiore a 6,00 m per consentire il transito dei mezzi di soccorso nei due sensi.

Il piazzale di emergenza deve avere una superficie non inferiore ai 500 m^2 ed inoltre è auspicabile la realizzazione in corrispondenza degli imbocchi principali di un'area di emergenza sanitaria, detta area di triage, avente una superficie complessiva non inferiore ai 500 m^2 sulla quale allestire una zona di primo soccorso e di smistamento dei feriti.

Il problema dell'accessibilità interna viene risolto come già visto nel paragrafo precedente per il miglioramento della sicurezza nelle gallerie esistenti ad esclusione delle vie d'esodo per le gallerie dotate di finestre cioè dotate di vere e proprie gallerie laterali che sfociano all'esterno. Poiché tali finestre dovrebbero essere utilizzate sia come vie di fuga che come accesso per le squadre di soccorso, devono avere una larghezza non inferiore ai 6 m ed un'altezza media in chiave non inferiore ai 5 m. Il percorso pedonale dovrà avere una larghezza netta di 120 cm. Al fine di rendere possibile l'impiego dei mezzi di soccorso all'interno delle finestre, andrà prevista una camera di manovra posta in adiacenza allo sbocco della finestra sulla galleria con una dimensione in pianta di 15 m x 15 m. Inoltre, per

evitare l'accesso di persone non autorizzate, le finestre devono essere protette da sistemi di chiusura apribili dall'interno per mezzo di maniglioni antipanico e dall'esterno per mezzo di apposite chiavi che saranno messe a disposizione delle autorità competenti per le operazioni di soccorso e del personale FS addetto alla manutenzione.

In relazione al piano di emergenza vale quanto detto al paragrafo precedente per il miglioramento della sicurezza nelle gallerie esistenti.

4.8 NORMATIVA ITALIANA SULLE GALLERIE FERROVIARIE

Per quanto riguarda la normativa italiana sulle gallerie ferroviarie ritroviamo:

- Decreto Ministeriale del 14 settembre 2005, Norme tecniche per le costruzioni;
- Decreto Ministeriale del 28 ottobre 2005, Sicurezza nelle gallerie ferroviarie.

4.8.1 Decreto Ministeriale del 14 settembre 2005

Il Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti, in accordo con il Ministro dell'Interno e con il Capo del Dipartimento della Protezione Civile ha emanato il Decreto 14 settembre 2005, le cui norme disciplinano la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle costruzioni, al fine di garantire prestabiliti livelli di sicurezza nei riguardi della pubblica incolumità.

In particolare per quanto riguarda le opere ferroviarie in sotterraneo vengono fornite delle indicazioni sulla sezione interna netta di una galleria ferroviaria; nello specifico viene evidenziato che la sezione deve consentire la presenza al suo interno di dispositivi quali il binario, il profilo minimo d'impianto degli ostacoli stabilito sulla base del gabarit cinematico di progetto con le relative regole di calcolo, la sagoma limite dei pantografi a cui vanno aggiunte le distanze e gli spostamenti dinamici in relazione al tipo di elettrificazione scelto, la posizione della linea di contatto per la trazione elettrica, le apparecchiature di segnalamento, i sistemi di sicurezza.

Inoltre, i fenomeni connessi con l'aerodinamica del treno rendono condizionante per il dimensionamento della sezione della galleria la valutazione delle variazioni di pressione percepite all'interno dei treni, nel contesto della sicurezza e del comfort degli organi dell'udito dei passeggeri. La variazione massima di pressione (differenza tra i valori estremi di sovrappressione e di depressione lungo un treno, compresi eventuali effetti dovuti alla

differenza di quota tra i due imbocchi della galleria) non deve superare i 10^4 Pascal, per l'intera durata del tragitto in galleria, alla velocità massima prevista all'atto della progettazione. Tale condizione deve essere verificata anche nell'eventualità di presenza di più treni in galleria e nel caso di incrocio fra questi.

4.8.2 Decreto Ministeriale del 28 ottobre 2005

Il Ministro delle Infrastrutture e dei Trasporti, in accordo con il Ministro dell'Interno ha emanato il Decreto 28 ottobre 2005, pubblicato nella Gazzetta Ufficiale n. 83 dell'8 aprile 2006, le cui norme hanno la scopo di assicurare un livello adeguato di sicurezza nelle gallerie ferroviarie attraverso l'adozione di specifiche prescrizioni tecniche di prevenzione e protezione rivolte al Gestore dell'infrastruttura.

Il Decreto non ha solo carattere prescrittivo ma possiede anche un aspetto prestazionale introdotto attraverso la metodologia innovativa dell'analisi di rischio.

Il Decreto è emanato in conformità agli indirizzi elaborati dalla Commissione Europea nel Libro Bianco del 2001 ("La politica europea dei trasporti fino al 2010").

Il Decreto ha lo scopo di assicurare un livello adeguato di sicurezza nelle gallerie ferroviarie, mediante l'adozione di misure di prevenzione e protezione atte alla riduzione di situazioni critiche che possano mettere in pericolo la vita umana, l'ambiente e gli impianti della galleria, nonché mirate alla limitazione delle conseguenze in caso di incidente. A tal fine, le gallerie ferroviarie devono essere progettate, costruite, sottoposte a manutenzione e tenute in esercizio in maniera da assicurare adeguati livelli di sicurezza agli utenti, ai lavoratori e agli incaricati delle operazioni di soccorso (art. 1).

Il Decreto si applica a tutte le gallerie ferroviarie di lunghezza superiore a 1000 m, siano esse già in esercizio, in fase di costruzione o allo stato di progettazione (art. 2).

Nell'esercizio delle gallerie ferroviarie devono essere valutati, in particolare, i pericoli derivanti da collisioni, deragliamenti e incendi. Quanto ai pericoli derivanti da rilasci di sostanze pericolose trasportate, il Gestore dell'infrastruttura valuterà le condizioni di sicurezza nella galleria imponendo vincoli gestionali e di esercizio. Le imprese ferroviarie metteranno in servizio a partire dal 5° anno dall'entrata in vigore del Decreto, materiale rotabile di nuova costruzione, rispondente a criteri di sicurezza.

Entro 15 anni dall'entrata in vigore del Decreto tutto il materiale rotabile circolante sulle

infrastrutture dovrà rispettare i criteri di sicurezza.

Per quanto riguarda le gallerie di valico, in parte interessanti un altro paese, devono essere concordati con apposita convenzione i requisiti di sicurezza e la metodologia di analisi dei rischi al fine di armonizzare i requisiti di sicurezza tra i Gestori delle infrastrutture (art. 3).

Il Ministero delle infrastrutture e dei trasporti vigila sull'attuazione del Decreto (art. 4).

Il Gestore della infrastruttura è responsabile del rispetto delle norme e delle procedure riguardanti la sicurezza della galleria, svolgendo in particolare i seguenti compiti:

1. approntamento della documentazione di sicurezza;
2. effettuazione delle ispezioni periodiche delle gallerie ed elaborazione delle relative procedure;
3. elaborazione ed attuazione di schemi organizzativi e operativi per i propri servizi di pronto intervento, nonché formazione adeguata ed equipaggiamento del personale dipendente;
4. definizione della procedura per la chiusura immediata di una galleria in caso di emergenza;
5. svolgimento delle inchieste per ogni episodio che abbia compromesso la sicurezza della galleria, comunicandone l'esito al Ministero;
6. raccolta delle informazioni per la banca dati, da fornire al Ministero secondo le direttive definite dallo stesso (art. 5).

Per ciascuna galleria il Gestore dell'infrastruttura nomina:

- il responsabile di galleria ed il suo sostituto, e ne comunica il nominativo al Ministero (art. 6).
- il responsabile della sicurezza ed il suo sostituto, e ne comunica il nominativo al Ministero. Il responsabile della sicurezza, può coincidere con il responsabile della galleria (art.7).

E' istituita la Commissione sicurezza formata da tecnici del Ministero delle infrastrutture e dei trasporti e del Ministero dell'interno, ed integrata da esperti al fine di esprimere parere sulla conformità, valutando, inoltre, aggiornamenti ed eventuali proposte di nuove metodologie di analisi di rischio. Il Decreto stabilisce inoltre che tutte le gallerie, il cui

progetto definitivo non sia stato ancora approvato prima dell'entrata in vigore dello stesso, sono soggette alle disposizioni in esso contenute (art. 9); invece, per le gallerie il cui progetto sia stato approvato e per le gallerie in costruzione, il Gestore dell'infrastruttura valuta la conformità del progetto e dell'opera in costruzione o in esercizio agli obiettivi di sicurezza (art. 10). Quanto alle gallerie già in esercizio alla data di entrata in vigore del Decreto, il Gestore dell'infrastruttura deve verificarne la rispondenza ai requisiti minimi entro tre anni a partire dalla data di entrata in vigore del decreto (art. 11).

Il Gestore dell'infrastruttura ha l'obbligo di effettuare ispezioni periodiche al fine di garantire che tutte le gallerie considerate nel decreto siano mantenute conformi alle disposizioni dello stesso. Delle singole ispezioni effettuate sarà redatto un rapporto da trasmettere al Ministero. Lo stesso Gestore deve, qualora constati che una galleria non è conforme alle disposizioni, definire le condizioni di sicurezza per il mantenimento in esercizio o la riapertura della galleria, da applicarsi fino al completamento degli interventi correttivi, ed ogni altra restrizione e disposizione che si rendesse necessaria (art. 12).

L'analisi dei rischi viene effettuata da un soggetto terzo o funzionalmente indipendente dal Gestore della infrastruttura, inoltre l'analisi dei rischi deve dimostrare che sono conseguiti gli obiettivi di sicurezza con particolare riferimento alla sicurezza degli utenti, del personale addetto e dei servizi di soccorso (art. 13). I responsabili delle gallerie devono compilare delle relazioni annuali sullo stato dell'infrastruttura e degli impianti; sugli eventi pericolosi e sugli incidenti, fornendone una valutazione e indicando gli interventi adottati o da adottare. Le relazioni sono trasmesse al Ministero entro la fine di ciascun anno dal Gestore dell'infrastruttura, il quale dovrà anche valutare i rapporti di sintesi dei responsabili di galleria, e redigere la relazione generale annuale sullo stato della sicurezza delle gallerie, da trasmettere alla Commissione sicurezza ed al Ministero (art. 14).

Nell'allegato I vengono riportate le definizioni principali relative a termini contenuti nel testo normativo che ne permettono, dunque, una migliore comprensione; fra queste riportiamo la definizione di:

- prevenzione: azioni intese a ridurre la probabilità di accadimento di un evento dannoso;
- protezione: azioni intese a ridurre le conseguenze di un evento dannoso;
- rischio: eventualità di un accadimento che può causare danno.

Nell'allegato II vengono definiti i requisiti e le misure di sicurezza atte a conferire alcune

funzioni essenziali al “sistema galleria” al fine di prevenire l’insorgere di situazioni di emergenza e mitigarne le eventuali conseguenze; in particolare gli obiettivi da conseguire sono:

- previsione e prevenzione degli eventi incidentali;
- protezione dei soggetti e mitigazione delle conseguenze;
- facilitazione dell’esodo delle persone e dell’intervento delle squadre di soccorso.

Per il raggiungimento di tali obiettivi vengono definiti dei requisiti minimi e dei requisiti integrativi. I requisiti minimi rappresentano le predisposizioni di sicurezza che devono essere messe in atto in tutte le gallerie regolamentate dal Decreto; mentre i requisiti integrativi dovranno essere individuati a seguito dell’analisi di rischio.

Nell’allegato III viene descritta la procedura relativa all’analisi quantitativa del rischio andando a scomporre il sistema treno-galleria nei **sottosistemi componenti**: infrastruttura, materiale rotabile, procedure operative.

Nell’allegato IV, infine, vengono descritte le procedure tecnico-amministrative per l’approvazione dei progetti delle gallerie, per la loro messa in esercizio e per lo svolgimento delle esercitazioni, nonché la documentazione che deve essere predisposta.

4.9 STATO NORMATIVO A LIVELLO EUROPEO

Un importante passo verso la sicurezza dei tunnel in Europa è stata la **direttiva 2004/54/EC** dal Parlamento europeo che è entrata in vigore il 30 aprile 2004 [8].

Gli stati europei che si sono invece dotati di una propria regolamentazione sulla sicurezza delle gallerie ferroviarie sono:

- Austria: raccomandazioni dell’autorità ferroviaria sui tunnel corti (< 1,5 km), medi (1,5 km ÷ 15 km), lunghi (15 km ÷ 25 km), molto lunghi (> 25 km);
- Francia: istruzione tecnica interministeriale che tratta gli aspetti infrastrutturali ed operativi, compreso il materiale rotabile, per gallerie fra 0,4 km e 10 km;
- Germania: direttiva dell’autorità ferroviaria sulle gallerie di nuove costruzione maggiori di 0,5 km;
- Inghilterra: linee guida su gallerie nuove o rimesse in esercizio;

- Norvegia: normativa sui requisiti minimi per gallerie maggiori di 1 km;
- Spagna: direttive sulle gallerie urbane (0,3 km ÷ 5 km) e non urbane (1 km ÷ 5 km), per gallerie maggiori 5 km studio ad hoc;
- Svezia: manuale sulle gallerie maggiori di 0,5 km, che prevede l'analisi dei rischi;
- Svizzera: standard di sicurezza che prevede su tutte le gallerie misure di sicurezza in funzione dell'analisi dei rischi.

Considerazioni più approfondite sulle norme dei vari paesi per la regolamentazione della sicurezza ed il progetto dei tunnel possono ritrovarsi nelle bibliografie [9] per i tunnel di strada, [10] per i tunnel ferroviari e [11] per le metropolitane.

Con riferimento particolare alle norme che riguardano la ventilazione in galleria è di sicuro interesse il lavoro di Bendelius che ha presentato elenchi ed informazioni su manuali ed orientamenti di diversi paesi [12].

4.10 L'ALLEGATO II DEL DM 28/10/2005

Per la valutazione della sicurezza e dei requisiti di sicurezza delle gallerie ferroviarie è di fondamentale importanza l'allegato II del Decreto del Ministero delle Infrastrutture del 28/10/2005, di cui si riporta uno stralcio semi-integrale poiché si ritiene che la comprensione dello stesso (così come dell'allegato III che sarà riportato in seguito) è fondamentale nel percorso che porta alle logiche del nuovo concetto prestazionale introdotto dalla norma stessa.

Nelle gallerie dei sistemi ferroviari il conseguimento degli obiettivi di sicurezza è il risultato di una combinazione ottimale di requisiti di sicurezza applicati all'infrastruttura, al materiale rotabile ed alle misure organizzative ed operative che possono essere adottate.

Le gallerie vanno dunque considerate nell'insieme delle strutture esistenti nell'itinerario ferroviario e non come elemento a sé stante.

L'ottenimento dell'adeguato livello di sicurezza può essere meglio assicurato se tutti i soggetti interessati aventi chiare e definite responsabilità (operatori ferroviari, gestori dell'infrastruttura, enti deputati alle azioni di soccorso e lotta agli incendi, etc.), sono coinvolti nell'analisi degli aspetti relativi alla sicurezza delle gallerie, partecipando inoltre alle esercitazioni secondo le modalità fissate dai piani di emergenza.

In particolare è auspicabile che in caso di incendio il treno possa essere arrestato fuori dalla galleria o comunque in luoghi opportunamente predisposti per l'esodo delle persone e l'intervento delle squadre di soccorso.

I requisiti e le misure di sicurezza da adottare in una galleria devono basarsi sulla considerazione sistematica di tutti gli aspetti del sistema comprendenti l'infrastruttura, l'esercizio, gli utenti ed il materiale rotabile.

Si deve tener conto dei seguenti parametri caratterizzanti il «sistema galleria»:

- Lunghezza della galleria;
- Volume di traffico;
- Tipologia di traffico;
- Presenza o assenza di deviatoi in galleria;
- Interconnessioni in galleria;
- Stazioni o fermate lungo linea in galleria;
- Possibilità di incrocio in galleria tra treni in transito;
- Andamento altimetrico;
- Localizzazione nel territorio (area urbana/extraurbana);
- Presenza di aree a rischio specifico in prossimità degli imbocchi.

I requisiti e le misure di sicurezza sono predisposizioni (a livello di infrastruttura, impianti fissi, materiale rotabile, procedure organizzative) atte a conferire alcune funzioni essenziali al «sistema galleria» al fine di prevenire l'insorgere di situazioni di emergenza e mitigarne le eventuali conseguenze.

Nell'allegato sono riportati i requisiti di sicurezza per le «gallerie ferroviarie», per il conseguimento dei seguenti obiettivi:

- Previsione e prevenzione degli eventi incidentali;
- Protezione dei soggetti esposti e mitigazione delle conseguenze;
- Facilitazione dell'esodo delle persone e dell'intervento delle squadre di soccorso.

Tali obiettivi possono essere raggiunti mediante l'adozione di:

- Requisiti (e misure) minimi;
- Requisiti (e misure) integrative.

4.10.1 Requisiti minimi

I requisiti minimi rappresentano le predisposizioni di sicurezza che devono essere messe in atto in tutte le gallerie di cui al Decreto. Per le gallerie caratterizzate dall'insieme dei seguenti parametri, il rispetto dei requisiti minimi costituisce condizione sufficiente a garantire un adeguato livello di sicurezza:

- lunghezza non superiore a 2 km;
- volume di traffico non superiore a 220 treni/giorno;
- traffico non contemporaneo di treni passeggeri e treni merci pericolose;
- andamento altimetrico senza inversioni di pendenza;
- assenza di aree a rischio specifico in prossimità degli imbocchi.

Per tali gallerie non è richiesta una specifica analisi di rischio. Le gallerie di lunghezza compresa tra 500 m e 1000 m, dovranno invece avere soltanto alcuni dei requisiti minimi. Si riporta di seguito l'elenco di tutti i requisiti minimi previsti dal DM 28/10/2005.

INFRASTRUTTURA

Prevenzione incidenti

Sistema di radiocomunicazione
Limitazione deviatoi in galleria
Controllo sistematico dello stato del binario
Protezione e controllo accessi
Ispezione regolare dello stato della galleria
Piano manutenzione galleria

Mitigazione delle conseguenze di incidenti

Resistenza e reazione al fuoco
Affidabilità delle installazioni elettriche
Impianto idrico antincendio

Facilitazione dell'esodo

Marciapiede
Corrimano
Segnaletica di emergenza
Illuminazione di emergenza nella galleria
Uscite / Accessi
Realizzazione Uscite / Accessi

Sistema di controllo fumi nelle vie di esodo
Impianto telefonico di emergenza (viva / voce) e di diffusione sonora

Facilitazione del soccorso

Piazzale di emergenza
Area di triage
Piazzole per l'elisoccorso
Strade di accesso
Impianto di radiopropagazione in galleria per le operazioni di soccorso
Disponibilità di energia elettrica per le squadre di soccorso
Postazioni di controllo
Sezionamento linea di contatto
Sistema di interruzione e messa a terra della linea di contatto

MATERIALE ROTABILE

Prevenzione e mitigazione incidenti

Misure di protezione dal fuoco (materiali di motrici e carrozze)
Rilevatori di incendio a bordo
Dispositivi manuali di allarme
Neutralizzazione freno di emergenza
Mantenimento della capacità di movimento
Impianti fissi di estinzione
Illuminazione d'emergenza

Facilitazione dell'esodo

Dimensionamento per l'esodo

PROCEDURE OPERATIVE

Prevenzione e mitigazione incidenti

Arresto per emergenza
Facilitazione dell'esodo
Formazione del personale
Informazioni di sicurezza e istruzioni sul comportamento in caso di emergenza

Facilitazione del soccorso

Piani di emergenza e soccorso
Esercitazioni periodiche con le squadre di soccorso
Mezzi di soccorso (mezzo bimodale)
Informazioni sul trasporto di merci pericolose
Disponibilità attrezzature di soccorso

4.10.2 Requisiti integrativi

I requisiti integrativi da adottare dovranno essere individuati a seguito dell'analisi di rischio di cui all'art. 13 del Decreto, per garantire un adeguato livello di sicurezza.

Sono da considerare requisiti integrativi anche i requisiti minimi qualora questi ultimi vengano resi più cautelativi o adottati per gallerie di lunghezza inferiore alla soglia indicata nello specifico requisito minimo.

I requisiti integrativi elencati di seguito rappresentano un riferimento indicativo ma non esaustivo per il progettista.

INFRASTRUTTURA

Prevenzione incidenti

Monitoraggio della velocità/sistema di segnalamento

Individuazione del treno (conta assi, circuito binario)

Impianti fissi per il controllo dello stato del treno:

- Impianti di Rilevamento Temperatura Boccole (RTB)
- Portali termografici
- Dispositivi che rilevano la differenza del carico sugli assi
- Impianti di rilevamento della sagoma del materiale rotabile
- Dispositivi per la verifica del carico assiale
- Dispositivi per la verifica delle ruote piatte

Indipendenza dei binari in galleria

Mitigazione delle conseguenze di incidenti

Requisiti di resistenza e reazione al fuoco (cavi elettrici)

Uscite / Accessi

Sezione collegamenti trasversali

Rivelazione di incendio, fumo e gas nei locali tecnici

Rivelatori di incendio, fumo e gas, installati nei locali tecnici

Sistema di controllo a distanza TVCC

Sistemi di estinzione incendio

Sistemi di estrazione fumi / Sistema di ventilazione

Facilitazione dell'esodo

Nicchie

Galleria parallela di servizio e di sicurezza

Facilitazione del soccorso

Accessibilità per veicoli stradali

Mezzi di soccorso
- carrelli ferroviari
- mezzi ordinari
- treno di soccorso
- treno di evacuazione

MATERIALE ROTABILE

Facilitazione dell'esodo

Equipaggiamento delle carrozze.

PROCEDURE OPERATIVE

Prevenzione incidenti

Orario / Programma di esercizio
Regolamenti per il trasporto di merci pericolose

4.11 L'ALLEGATO III DEL DM 28/10/2005 - ANALISI DI RISCHIO

L'articolo 13 del DM 25 ottobre 2005 recita:

L'analisi dei rischi viene effettuata da un soggetto terzo o funzionalmente indipendente dal Gestore della infrastruttura, secondo i principi generali riportati nell'Allegato III. L'analisi dei rischi deve dimostrare che, con i parametri di riferimento e i requisiti di sicurezza, di cui all'Allegato II, sono conseguiti gli obiettivi di sicurezza di cui all'Allegato III, con particolare riferimento alla sicurezza degli utenti, del personale addetto, dei servizi di soccorso.

L'analisi quantitativa dei rischi nelle gallerie ferroviarie deve essere inquadrata in una logica generale di sistema, adattata allo specifico ambito del sistema treno-galleria, ed articolata nei sottosistemi di natura strutturale o funzionale secondo le indicazioni della direttiva 96/48/CE del 23 luglio 1996 e 2001/16/CE del 19 marzo 2001 e decisioni seguenti.

Più in particolare, l'analisi di rischio deve fare riferimento alla scomposizione del sistema treno-galleria nei sottosistemi componenti **infrastruttura, materiale rotabile e procedure operative** (rif. documento UIC - Codex 779-9 «Safety in Railway tunnels»).

L'analisi di rischio deve valutare i diversi rischi in una galleria, tenendo conto di tutti gli elementi inerenti alle sue peculiarità progettuali, alle condizioni e al tipo di traffico (modello di circolazione), alle frequenze di circolazione delle diverse tipologie di traffico (passeggeri o

merci), alle caratteristiche della infrastruttura e dei rotabili.

L'analisi di rischio ha lo scopo iniziale di valutare le probabilità di accadimento di eventi incidentali preventivamente identificati unitamente alla valutazione di un indicatore della gravità delle conseguenze connesse all'evolversi degli stessi eventi.

Qualora in ragione del livello di rischio valutato si adottino opportune misure e dispositivi per la riduzione del rischio stesso (rif. All. II), l'analisi viene reiterata per la valutazione del rischio residuo.

In particolare le misure e i dispositivi di sicurezza che mirano a ridurre il rischio si devono distinguere (rif. documento UIC - Codex 779-9 «Safety in Railway tunnels» richiamato in Allegato II) in:

- misure di prevenzione (**prevention of incidents**, UIC), allo scopo di ridurre la probabilità di innesco di eventi incidentali caratteristici (Eventi Iniziatori, EI) relativi al sistema treno-galleria;
- misure di protezione (individuale e collettiva) e mitigazione delle conseguenze derivanti dal verificarsi dei suddetti eventi incidentali (**mitigation of impact**, UIC);
- misure di facilitazione dell'allontanamento dai luoghi di pericolo (autosoccorso) (**facilitation of escape**, UIC);
- misure di facilitazione degli interventi di soccorso (**facilitation of rescue**, UIC).

Inoltre, per le gallerie molto lunghe, si possono adottare ulteriori misure aggiuntive.

È peraltro compito specifico dell'analisi di rischio valutare anche gli effetti in termini di riduzione del rischio dovuto all'insieme di misure e dispositivi di protezione / mitigazione e facilitazione adottati (PMF), distinti per singoli sottosistemi (vedi Allegato II), precisando l'eventuale interazione sinergica o antagonistica delle singole misure.

4.11.1 Scenari Incidentali di riferimento

Sono stati identificati alcuni scenari incidentali principali di riferimento, relativi all'emergenza in galleria, conseguenti all'insorgenza dei seguenti eventi critici iniziatori:

- INCENDIO (S1);
- DERAGLIAMENTO (S2);
- COLLISIONE (S3).

Questi scenari devono necessariamente essere considerati.

Ulteriori scenari, relativi per esempio ad atti vandalici e attentati, non sono oggetto della procedura descritta nel Decreto, dal momento che questi non rappresentano scenari incidentali tipici ed esclusivi del sistema treno-galleria. In casi particolari può essere necessario considerare tali scenari nell'ambito della formulazione estesa della analisi di rischio.

Con riferimento ad un'analisi di rischio di tipo probabilistico i tre scenari incidentali considerati devono essere costruiti in modo da risultare mutuamente disgiunti e dunque da costituire un gruppo completo di eventi incompatibili, in modo tale che il rischio complessivo relativo all'emergenza in galleria sia somma dei rischi relativi ai singoli scenari incidentali.

I tre scenari incidentali di riferimento potranno evolvere verso differenziate configurazioni stazionarie di fine emergenza caratterizzate da diversi livelli di danno all'uomo, al materiale e all'infrastruttura a seconda che si verifichi funzionamento corretto o malfunzionamento delle misure di protezione e mitigazione realizzate a livello di:

- sottosistema INFRASTRUTTURA;
- sottosistema MATERIALE ROTABILE;
- sottosistema PROCEDURE OPERATIVE.

In definitiva l'evoluzione del singolo scenario incidentale verso una conseguenza di danno massimo, minimo o intermedio deriva dalla presenza, dall'efficacia e dall'efficienza dei sistemi protettivi e mitigativi realizzati a livello di: infrastruttura, materiale rotabile, procedure operative, nonché delle misure di facilitazione dell'autosoccorso e soccorso.

Le procedure operative sintetizzano il ruolo congiunto dei sottosistemi: manutenzione del sistema ferroviario, controllo-comando e segnalamento del sistema ferroviario, energia del sistema ferroviario, esercizio del sistema ferroviario.

La procedura può essere estesa sulla base delle seguenti possibili integrazioni:

- aumento del numero di scenari incidentali di riferimento;
- aumento del livello di dettaglio dei sottosistemi.

La rappresentatività della descrizione degli scenari incidentali, ed in particolare del livello di dettaglio con cui viene specificata la gravità delle conseguenze da essi derivanti, è funzione della rappresentatività, veridicità e precisione dei dati di riferimento.

La procedura può essere estesa anche allo studio delle cause di innesco dei singoli eventi iniziatori caratteristici dello scenario (Incendio, Deragliamento, Collisione), sulla base delle usuali tecniche ad Albero delle Cause, al fine di identificare la probabilità di accadimento dell'evento.

4.11.2 Accettabilità del rischio

In ragione dell'aleatorietà della misura del danno, l'accettabilità del rischio deve essere preliminarmente valutata nella sola componente della salvabilità dei passeggeri.

I risultati derivanti dall'analisi ad Albero degli Eventi forniscono la stima della distribuzione di probabilità di accadimento del livello di danno associato alle conseguenze degli scenari incidentali di riferimento.

Sulla base di tali dati si definisce una misura del livello di **Rischio Atteso Totale** (R), per una specifica opera e per uno specifico regime di traffico, che può esprimersi come:

$$R = \sum_{i=1}^{n} p_i \cdot C_i \qquad (4.1)$$

dove **R** è il rischio atteso, $\mathbf{p_i}$ è la probabilità di accadimento dell'i-esima conseguenza, $\mathbf{C_i}$ è il valore dell'indicatore di danno associato alla conseguenza i-esima ed **n** è il numero di eventi-conseguenza.

La misura del livello di **Rischio Atteso Individuale** (IR) si ottiene, normalizzando il valore del precedente indicatore rispetto alla popolazione esposta in un intervallo di tempo prefissato (un anno) e per chilometro percorso in galleria.

È altresì ben definito un livello di **Rischio Cumulato** (CR) sulla base della distribuzione di probabilità cumulata del livello di danno riferita sempre ad un anno.

Il livello di rischio cumulato fornisce la probabilità (cumulata) che si abbia un danno maggiore di un'assegnata soglia di tolleranza.

Il rischio atteso individuale unitamente al rischio cumulato costituiscono le grandezze di riferimento per l'accettabilità del livello di sicurezza del passeggero associato alla singola specifica galleria.

I dati complessivi ottenuti dall'Analisi di Rischio, effettuata su tutte le gallerie distribuite

lungo la rete ferroviaria, messi a confronto da una parte con i dati statistici dell'incidentalità e dall'altra con le aspettative di sicurezza della collettività, consentono di definire gli obiettivi di rischio in termini di soglie di rischio individuale e cumulato.

Considerato inoltre, che il sistema ferroviario può evolvere, i valori di soglia suddetti sono suscettibili di essere modificati di conseguenza.

Rispetto alla richiesta di validazione dei requisiti minimi come condizioni sufficienti per garantire la sicurezza dei passeggeri per una determinata classe di gallerie, è necessario poter valutare il livello di rischio relativo ad una singola galleria.

Un indicatore che permette di valutare il livello di rischio relativo ad una singola galleria, e quindi anche per la valutazione della sufficienza dei suddetti requisiti minimi per garantire un fissato livello di sicurezza dei passeggeri, è il rischio atteso individuale IR.

Secondo dati di letteratura per i rischi liberamente assunti viene registrato statisticamente un rischio individuale per anno compreso tra 10^{-4} e 10^{-5}, mentre per quelli involontari si va da 10^{-6} a 10^{-8}.

Ipotizzando, in modo cautelativo, che ciascun utente percorra in media 1000 km l'anno sul sistema ferroviario, il valore di rischio individuale in galleria viene fissato in:

$$IR = 10^{-9} \frac{\text{fatalità}}{\text{passeggeri} \cdot \text{km} \cdot \text{anno}} \tag{4.2}$$

Per quanto sopra esposto, il rischio individuale definisce il valore atteso di rischio annuo per passeggero per km; la soglia di attenzione è fissata a 10^{-11} e la soglia di inaccettabilità a 10^{-9}.

Il valore fissato per la soglia di attenzione tiene conto anche dell'incertezza sulla percentuale di percorrenza in galleria e dell'incertezza sulle informazioni e sui dati disponibili per i calcoli.

Qualora il rischio calcolato ricadesse in zona di attenzione è richiesto di documentare in modo esauriente la precisione e rappresentatività dei dati utilizzati nonché l'accuratezza della procedura; nel caso di residua incertezza è richiesto di procedere con una valutazione di tipo ALARP (As Low As Reasonably Possible).

L'indicatore di rischio cumulato consente di valutare gli effetti dell'evoluzione degli eventi

pericolosi sui passeggeri esposti.

Come criterio di accettabilità del rischio cumulato si procede ad un'analisi sulla base del criterio definito come probabilità che si verifichino, in un fissato periodo di tempo e per chilometro di galleria, non più di un predeterminato numero di fatalità [N / (km · anno)].

Al fine di identificare una soglia di accettabilità viene introdotto un criterio di limitazione sul piano **P**[N / (km · anno) > x] - **N** dove viene presa in considerazione la probabilità che le fatalità superino una predeterminata soglia.

Il dato della probabilità di superamento 1 - F(x) è normalizzato rispetto ai chilometri di percorrenza annua sulla rete.

Da solo il criterio basato sull'indicatore di rischio cumulato non può essere adottato come criterio di accettabilità nell'analisi della singola galleria; esso deve essere associato a quello individuale.

4.11.3 Analisi di rischio base (ARB)

La procedura di Analisi di Rischio Base, con riferimento ai requisiti di sicurezza minimi, di cui all'Allegato II, definisce un metodo per la validazione di tali requisiti non solo come necessari ma anche come condizioni sufficienti per garantire la sicurezza dei passeggeri in una data galleria.

Questa è una procedura semplificata mirata alla verifica dell'incolumità e quindi della salvabilità dei passeggeri, ipotizzando e simulando uno scenario in cui la sopravvivenza dei passeggeri è condizionata essenzialmente dall'autosoccorso.

Nel sistema treno - galleria assume particolare rilievo lo scenario incidentale che prevede il simultaneo verificarsi di incendio e perdita di mobilità del rotabile.

L'Analisi di Rischio Base è focalizzata sullo studio di tale scenario e sull'efficacia del complesso di misure e dispositivi di sicurezza prioritariamente con riferimento a passeggeri, addetti e soccorritori. Essa è dunque definita assumendo unitaria la probabilità di malfunzionamento dei sottosistemi materiale rotabile e procedure operative e ritenendo efficaci ai fini della salvabilità dei passeggeri solo le condizioni di esodo.

La procedura di Analisi di Rischio Base è eseguita per un fissato volume di traffico ed è caratterizzata dai seguenti parametri:

- sviluppo della galleria: distanza tra gli imbocchi o interdistanza tra vie di esodo fruibili ($L_{efficace}$);
- tipo di traffico: merci, viaggiatori, misto leggero (merci < 30%), misto pesante (merci > 30%);
- peculiarità progettuali (presenza di deviatoi, interconnessioni o stazioni; possibilità di incrocio tra treni in transito; andamento altimetrico; localizzazione della galleria; rischi di area specifici in prossimità degli imbocchi).

L'evento iniziatore incendio è dunque assunto vincolato all'evento di arresto del convoglio in galleria, con conseguente impossibilità del treno di sottrarsi alle condizioni critiche. Si suppone, inoltre, che un eventuale intervento delle squadre di soccorso non sia efficace al fine di mettere in salvo passeggeri e addetti del treno incidentato.

La sufficienza dei requisiti minimi è condizionata così essenzialmente dalla realizzazione dell'esodo in sicurezza dei passeggeri (autosoccorso) nell'ipotesi di insorgenza di un focolaio di incendio e di avanzamento del fronte di fumo in galleria.

Le condizioni di sicurezza sono determinate sulla base del confronto tra andamento delle concentrazioni dei prodotti tossici della combustione, delle concentrazioni di ossigeno e della visibilità lungo la galleria e tempo d'esodo dei passeggeri.

La procedura di analisi di rischio base, sviluppata con riferimento alla realizzazione dell'esodo in sicurezza dei passeggeri (autosoccorso) e applicata ad una opportuna ed esauriente varietà di casi tipo, al variare delle variabili di progetto, fornisce una base di dati per la verifica del rispetto delle condizioni di accettabilità ovvero della necessità di svolgere un'analisi di rischio estesa.

Ne derivano le seguenti considerazioni:

1. le gallerie di lunghezza compresa tra 1000 m e 2000 m, corredate dei requisiti minimi e caratterizzate dai parametri indicati nell'introduzione dell'Allegato II (Volume di traffico non superiore a 220 treni/giorno; andamento altimetrico senza inversioni di pendenza), garantiscono un adeguato livello di sicurezza rispetto alla realizzazione dell'esodo dei passeggeri (autosoccorso) e quindi non vanno sottoposte all'Analisi di Rischio: tale classe di gallerie definisce la **Zona Requisiti Minimi**; qualora non fossero caratterizzate dai parametri sopra indicati vanno sottoposte all'Analisi di Rischio Base;

2. le gallerie di lunghezza compresa tra 2000 m e 9000 m, corredate dei requisiti minimi e caratterizzate dai parametri sopra indicati vanno comunque sottoposte all'Analisi di Rischio Base per la valutazione della sufficienza delle misure di sicurezza applicate;
3. le gallerie di lunghezza compresa tra 1000 m e 9000 m non corredate dei requisiti minimi, ma caratterizzate dai parametri sopra indicati vanno sottoposte all'Analisi di Rischio Base; qualora non fossero caratterizzate dai parametri sopra indicati vanno sottoposte all'Analisi di Rischio Estesa;
4. le gallerie di lunghezza superiore ai 9000 m vanno sottoposte all'Analisi di Rischio Estesa.

Comunque, tutte le gallerie ove non sia possibile escludere sia la contemporanea presenza di treni trasportanti merci pericolose e treni passeggeri sia la presenza di rischi di area specifici in prossimità degli imbocchi, vanno sottoposte all'Analisi di Rischio Estesa al fine di individuare specifici provvedimenti da adottare caso per caso.

L'Analisi di Rischio Estesa deve essere condotta in tutti i casi in cui l'Analisi di Rischio Base non consente di dimostrare la sufficienza delle misure applicate.

4.11.4 ANNESSO A - Schema indicativo delle fasi operative dell'analisi di rischio

1. **Identificazione dei pericoli**
   Lista preliminare dei pericoli, con evidenza del percorso che conduce alla loro identificazione, attraverso l'analisi del sistema e delle funzioni necessarie a garantire i requisiti operativi del sistema stesso. Attraverso l'analisi storica degli eventi incidentali, considerando la omogeneità delle informazioni a disposizione, si definisce una classe di eventi pericolosi la cui probabilità di accadimento è significativa.
2. **Classificazione e selezione degli eventi pericolosi**
   Classificazione e selezione dei pericoli, di cui al punto 1, significativi in base alla valutazione empirica delle frequenze / probabilità di accadimento e della gravità delle conseguenze per ciascun evento pericoloso.
3. **Stima delle probabilità di accadimento degli eventi pericolosi**
   Analisi frequentista / soggettiva degli eventi pericolosi selezionati, con chiara

indicazione delle fonti e/o dei criteri di valutazione adottati. Si indica il livello di significatività, rappresentatività e precisione statistica dei dati utilizzati.

4. **Analisi degli scenari incidentali**
   Sviluppo delle sequenze incidentali conseguenti agli eventi pericolosi selezionati. Si individuano gli scenari incidentali più frequenti o comunque possibili sulla base dei dati storici a disposizione.

5. **Stima delle probabilità degli eventi caratteristici degli scenari incidentali**
   A partire da dati storico / statistici o attraverso valutazioni di tipo soggettivo si valutano le probabilità degli eventi elementari e degli eventi complessi che caratterizzano gli scenari incidentali, evidenziando il livello di significatività, rappresentatività e precisione statistica dei dati utilizzati.

6. **Analisi delle conseguenze**
   Analisi delle conseguenze per gli scenari incidentali identificati. Si individuano le conseguenze in termini di fatalità.

7. **Valutazione dei profili di rischio individuale e collettivo**
   Si valuta il rischio individuale, primariamente in termini di danno atteso relativo al singolo passeggero. Ad un livello di maggiore dettaglio si possono prendere in esame anche le conseguenze relative agli infortunati e ai danni ai beni.
   Si valuta il rischio collettivo considerando la probabilità cumulata relativa al numero annuo di fatalità per il complesso del comparto gallerie.

8. **Misure per la riduzione del rischio**
   Analisi delle misure e dispositivi di tipo costruttivo, impiantistico, strumentale ed organizzativo. Si elencano le tipologie di misure da mettere in atto per fronteggiare gli scenari critici evidenziati al fine di ridurre la probabilità di accadimento o la gravità delle conseguenze: misure di prevenzione (riduzione della probabilità di accadimento degli eventi pericolosi iniziatori), misure di protezione, mitigazione e facilitazione (contenimento del malfunzionamento dei sottosistemi considerati e della gravità delle conseguenze).

4.11.5 ANNESSO B - Lista preliminare degli eventi pericolosi e delle cause

La seguente lista è strutturata su due livelli. Il primo livello corrisponde alla lista preliminare degli eventi pericolosi; il secondo livello è invece rappresentativo delle cause principali che possono portare all'evento pericoloso.

I pericoli sotto riportati garantiscono una copertura esemplificativa esauriente ma non esaustiva delle tipologie di eventi che possono verificarsi durante l'esercizio di un sistema ferroviario.

Deragliamento

- Guasto o cedimento strutturale del materiale rotabile
- Cedimento strutturale o deterioramento del tracciato
- Guasto ai sistemi di controllo della circolazione
- Impatto con oggetti sulla linea
- Cedimenti strutturali opere civili
- Esplosione / Fuoco a bordo
- Errore umano a bordo
- Errore umano al posto centrale

Collisione

- Guasto alle logiche di interlocking
- Prestazioni ridotte dell'impianto frenante
- Presenza di convoglio non segnalato sulla via
- Presenza di ostacoli in linea
- Errato controllo della circolazione dovuto a incompatibilità elettromagnetica
- Perdita dell'impianto frenante per guasti all'elettronica di bordo
- Errore umano a bordo
- Errore umano al posto centrale (o controllo)

Incendio

- Rilascio di sostanze infiammabili, tossiche, pericolose trasportate o esterne
- Corto circuito a bordo
- Corto circuito della linea di alimentazione
- Surriscaldamento organi di rotolamento
- Difetto impianto frenante rotabili
- Incendio di materiale combustibile in galleria

Interferenza con sistemi di distribuzione di fluidi pericolosi presso gli imbocchi

- Esplosione / Incendio
- Rilascio di sostanze pericolose

Generici pericoli per i passeggeri

- Intrappolamento tra convoglio e banchina
- Intrappolamento nelle porte
- Tentativo di discesa a treno già avviato
- Treno in movimento con porte aperte
- Porte aperte dal lato sbagliato

Altri pericoli

- Perdita completa di potenza elettrica
- Guasto ai sistemi anti intrusione
- Perdita di trazione della motrice
- Sezione di linea disalimentata
- Perdita completa di alimentazione agli apparati di linea
- Perdita dell'impianto di telecontrollo
- Manutenzione inadeguata

4.11.6 ANNESSO C - Banche dati incidentali

Per la rete gestita da RFI esiste una banca dati di eventi incidentali nella quale sono riportate tutte le informazioni di dettaglio sulla cui base possono essere effettuate valutazioni statistiche per l'analisi di rischio.

L'accesso alla banca dati di RFI da parte di altri operatori ferroviari viene assicurato attraverso la Direzione Generale del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti che si rende garante del trattamento riservato delle informazioni fornite.

Si presenta di seguito uno schema di format tipo per la redazione di schede di evento incidentale che costituiscono l'informazione elementare per costruzione della banca dati. Si tratta di un rapporto (standardizzato) sul tipo di evento, livello delle conseguenze e ipotesi di causa; da compilarsi secondo canoni predeterminati e che deve dunque contenere:

Dati anagrafici

- Data dell'evento
- Luogo dell'evento
- Tipologia del luogo (stazione, in linea, in galleria, etc.)
- Descrizione dell'evento
- Descrizione delle cause determinanti
- Descrizione delle conseguenze in termini di danni a persone, cose e infrastrutture
- Tipo di rotabile
- Tempo di interruzione della circolazione

Dati valutativi

- Identificazione dei sottosistemi o ambiti (infrastruttura, materiale rotabile, procedure operative) nei quali si è verificato l'evento incidentale
- Valutazione del livello di gravità delle conseguenze provocate dall'evento
- Nesso di causa-effetto tra "accadimento / malfunzionamento / conseguenze"

Dati storico statistici relativi alla classe dell'evento incidentale / malfunzionamento

- Dato cumulato relativo all'incidentalità
- Dato cumulato relativo al tasso di malfunzionamento / guasto

4.11.7 ANNESSO D_1 - Descrizione dell'ARB in ambito probabilistico

Nella procedura indicata si considerano gli effetti combinati e concatenati dell'evento di riferimento S1 (incendio) nei tre sottosistemi.

La probabilità di accadimento della singola conseguenza finale è data dal prodotto delle probabilità (%) di accadimento dei singoli sottoeventi (Malfunzionamento o Funzionamento corretto di Infrastruttura, Materiale Rotabile e Procedure Operative) che concorrono alla definizione dei rami che conducono alla conseguenza stessa.

Le conseguenze vengono gerarchizzate a partire dal danno più severo, (D_{max}) a quello meno severo, (D_{min}) rispetto ad una opportuna misura di utilità/danno convenzionale, determinata dal livello di sicurezza associato alla generica conseguenza. Le probabilità di accadimento delle suddette conseguenze sono indicate con P_1, ... P_8.

La misura del livello di gravità associata alla generica conseguenza (D_i) è definita attraverso un indicatore di Danno adimensionale (0 indica danno nullo, 1 indica danno massimo) dipendente dal valore dei parametri caratterizzanti.

La procedura suggerita si basa sulle elaborazioni di un simulatore che descrive l'esodo dal treno all'interno della galleria fino al raggiungimento dell'uscita della galleria stessa e sulla base del quale è possibile caratterizzare la distribuzione dell'indicatore di danno relativamente ad un convoglio prototipo. A partire da tale distribuzione si stima il rischio totale R.

Al fine di indagare il comportamento di una generica galleria di lunghezza inferiore (o uguale) a 2000 m, nelle condizioni specificate in precedenza, si definisce innanzitutto la probabilità di accadimento dell'evento S1 in gallerie di lunghezza minore o uguale a 2000 m,

come il prodotto della probabilità di accadimento del suddetto evento nel generico punto della linea ferroviaria per la probabilità che il treno si trovi durante il suo percorso all'interno di una galleria di lunghezza effettiva minore o uguale a 2000 m.

Noto il valore della probabilità di accadimento dell'evento iniziatore considerato, per fissati volumi e tipologie di traffico, e tenendo conto dei risultati derivanti dalla simulazione d'esodo in termini di distribuzione di probabilità associata all'indicatore adimensionale di danno si determina il valore del livello di rischio individuale da confrontarsi con le soglie di accettabilità e inaccettabilità stabilite.

Il livello di rischio individuale relativo alla classe di gallerie prese in considerazione è definito dalla seguente relazione:

$$IR_{2000} = \underbrace{P(S1)\cdot P(L \le 2000m)}_{\substack{\text{probabilità di accadimento dell'evento} \\ \text{S1 in gallerie di lunghezza} \le 2000\ \text{m}}} \cdot \frac{1}{N_{pass}} \cdot \sum_{i=1}^{M}\left[N_i \cdot P(N = N_i)\right] \tag{4.3}$$

dove $\mathbf{N_i}$ è il generico valore della variabile numero di fatalità, ottenuto come risultato della simulazione, $\mathbf{N_{pass}}$ è il numero totale dei passeggeri presenti all'interno del convoglio e **M** è il massimo numero di fatalità in corrispondenza della galleria considerata e relativamente a fissati valori di volume e tipologia di traffico.

La suddetta procedura di analisi di rischio base, sviluppata con riferimento alla realizzazione dell'esodo in sicurezza dei passeggeri (autosoccorso) ed applicata ad una opportuna ed esauriente varietà di casi tipo, al variare della lunghezza efficace, fornisce una base di dati per la verifica del rispetto delle condizioni di accettabilità ovvero della necessità di svolgere un'analisi di rischio estesa.

Per gallerie di lunghezza efficace compresa tra 2000 m e 9000 m eventualmente dotate di requisiti integrativi e caratterizzate da valori degli altri parametri considerati nell'analisi di rischio (tipo di traffico e procedimenti progettuali) favorevoli, si adotta il concetto di Lunghezza Equivalente L_e e di Sicurezza Equivalente.

La Lunghezza Equivalente di una galleria è una lunghezza virtuale associata al livello di rischio caratteristico di una galleria, in corrispondenza del medesimo valore di probabilità dell'evento iniziatore associato alla galleria specifica.

4.11.8 ANNESSO D_2 - Descrizione del modello deterministico di riferimento

Descrizione generale dello scenario.

Si ipotizza l'incendio di una carrozza di un treno passeggeri, fermo in galleria in posizione centrale rispetto agli imbocchi. La sezione della galleria è del tipo a singola canna e doppio binario, di superficie pari a 80 m^2; la lunghezza della galleria è pari a 4 km.

Si valuta l'andamento nel tempo, all'interno della galleria, delle grandezze rappresentative del rischio per le persone dovuto all'incendio:

- distribuzione delle concentrazioni di fumi e gas tossici prodotti dall'incendio (CO, HCN, HCl, CO_2) e delle altre specie chimiche significative ai fini del rischio (difetto di O_2, particolato) all'interno della galleria e loro andamento nel tempo;
- distribuzione delle temperature all'interno della galleria e loro andamento nel tempo; in particolare lungo i percorsi di esodo;
- distribuzione dell'irraggiamento termico all'interno della galleria e suo andamento nel tempo.

Determinazione della curva di rilascio della potenza termica.

Al fine di valutare la curva di rilascio più appropriata è stato studiato l'incendio di una carrozza passeggeri, con innesco ipotizzato su una poltroncina, considerando altresì la successiva rottura dei finestrini.

Tale studio ha consentito di determinare i valori di picco delle grandezze rappresentative del rischio per lo scenario in oggetto.

I materiali considerati nello sviluppo del modello sono tutti assimilati, per quanto riguarda le loro proprietà termodinamiche, al poliuretano, materiale, tra quelli presenti sulla carrozza tipo, che presenta il comportamento più severo dal punto di vista della partecipazione al fuoco e della produzione dei prodotti tossici della combustione (in particolare CO e HCN).

Ipotesi adottate per la definizione dello scenario - Incendio di riferimento.

Lo scenario incidentale di riferimento si caratterizza per essere rappresentativo di una vasta classe di scenari incidentali e per lo stesso sono stati individuati i rispettivi parametri conservativi:

- la curva del rilascio prescelta prevede uno sviluppo graduale della potenza del

focolaio (tempo complessivo di sviluppo non inferiore ai 10 min) sino al valore di 10 MW e si assume che essa rimanga costante per tutta la durata della simulazione;

- la lunghezza della galleria è pari a 4000 m;
- la sezione della galleria ove è ipotizzato l'incendio è della tipologia singola canna doppio binario;
- si assume che l'incendio si sviluppi al centro della galleria;
- la velocità di esodo in galleria è ipotizzata pari a 0,6 m/s;
- il tempo necessario per l'esodo della totalità dei passeggeri dalle carrozze si assume pari a 180 s;
- si ipotizza inoltre che tutti i passeggeri riescano a raggiungere il marciapiede laterale di esodo;
- la temperatura ambiente iniziale è considerata pari a 20 °C;
- la concentrazione iniziale di ossigeno è considerata pari a 20,7% (valore in atmosfera al livello del mare).

Rischi ai quali i passeggeri sono esposti durante l'esodo.

La salvabilità dei passeggeri più sfavoriti è condizionata dal buon esito delle tre fasi distinte dell'esodo:

- esodo dal vagone incendiato;
- allontanamento dal vagone incendiato;
- raggiungimento delle uscite.

Durante la prima fase dell'esodo sia il rischio termico, legato a parametri di rischio quali irraggiamento e temperatura dei gas caldi della combustione, sia il rischio chimico legato alla concentrazione dei prodotti tossici della combustione quali CO, HCN, HCl ed alla ipossia, cioè alla mancanza di O_2, sono elevati.

Durante la seconda fase dell'esodo il rischio principale è di tipo termico, legato soprattutto all'irraggiamento.

Durante la terza fase dell'esodo verso l'uscita il rischio principale è di tipo chimico e termico.

Calcolo del grado di inabilità indotto sui passeggeri durante l'esodo.

Al fine di valutare le capacità di esodo sono stati calcolati degli indicatori, definiti dosi frazionali inabilitanti (fractional effective dose), secondo la norma ISO/TS 13571:2002 [69], *"Life threat of fires - Guidance on the estimation of time available for escape using fire data"*, per ogni parametro sia di rischio chimico (concentrazioni di sostanze tossiche, irritanti, nonché dell'ossigeno, ai fini della valutazione dell'ipossia) sia di rischio termico (temperature dei gas e dell'aria, valori di irraggiamento termico ai quali gli esodanti sono esposti in galleria).

I parametri sopra citati sono rappresentativi delle condizioni di vivibilità all'interno della galleria ed in particolare lungo i percorsi di esodo; gli andamenti nel tempo dei valori dei parametri di rischio costituiscono la base dei dati utilizzata per l'applicazione dei modelli empirici proposti nella norma ISO 13571, ed assunti come modelli matematici per la valutazione dei dati calcolati in base a questa simulazione di incendio.

L'approccio utilizzato si basa sul calcolo del tempo disponibile per l'esodo dei passeggeri attraverso un percorso interessato dalla diffusione dei prodotti dell'incendio quali fumi e calore.

Gli effetti di cui le formule empiriche del modello proposto nel documento succitato tengono conto sono computati in base ai valori assunti dai parametri di rischio lungo la galleria ed al tempo di esposizione delle persone a ciascun elemento di rischio; tali effetti sono funzione del prodotto delle concentrazioni di ciascun parametro di rischio (CO, CO_2, HCl, HCN, etc.) pesato con il tempo di esposizione e normalizzato rispetto ad un valore limite costituente il parametro di riferimento, FED fractional effective dose, per il calcolo del tempo disponibile per l'esodo.

Il calcolo delle dosi frazionali è finalizzato a confrontare, per ogni parametro di rischio, il valore ottenuto, rappresentativo della dose frazionale inabilitante complessivamente assunta dal generico passeggero durante l'esodo, con il valore di soglia (a seguito della normalizzazione rispetto al valore di soglia i valori ottenuti sono compresi tra 0 ed 1). Il valore 1 corrisponde al raggiungimento della condizione di impossibilità di autosoccorso.

Sintesi dei risultati del modello deterministico applicato allo scenario di riferimento.

Dai risultati dell'applicazione del modello, relativi alla galleria tipo indicata, sono state ricavate dosi frazionali inabilitanti complessive, rappresentative del rischio chimico e del

rischio termico:

- dose frazionale inabilitante complessiva relativa al rischio termico **F_T = 0,08**;
- dose frazionale inabilitante complessiva relativa al rischio da ipossia **F_O = 0,006**;
- dose frazionale inabilitante complessiva relativa al rischio chimico **F_{Ch} = 0,05**.

I valori sopra riportati mostrano che il rischio associato all'esodo dei passeggeri è da considerarsi accettabile in quanto i valori delle dosi frazionali inabilitanti sono tutti inferiori ai valori limite di accettabilità pari a 0,3, come indicato dalla stessa norma ISO.

Calcolo del rischio per una galleria generica sulla base dei risultati del modello deterministico applicato allo scenario di riferimento - Analisi di Rischio Base.

L'ARB si sviluppa rapportando i risultati del modello deterministico ottenuti per lo scenario di riferimento alla galleria oggetto dell'analisi. L'ARB si applica a tutte le gallerie ferroviarie.

Sensibilità dei parametri di rischio rispetto ai parametri specifici di progetto.

La salvabilità dei passeggeri, che si ipotizza effettuino l'esodo attraverso i marciapiedi, dipende:

- dalle concentrazioni dei prodotti della combustione;
- dalla temperatura ed irraggiamento termico alla quale sono esposti durante l'esodo;
- dai tempi di esposizione.

Tali parametri di rischio dipendono sostanzialmente dalla configurazione geometrica della galleria.

Gli elementi caratteristici che incidono in maniera significativa sul rischio termico e chimico sono i seguenti:

- **sezione della galleria S_g**
  incide principalmente sulle concentrazioni dei prodotti della combustione dipendendo da tale grandezza il volume all'interno del quale i fumi si distribuiscono;
- **interdistanza massima delle uscite pedonali L_{eff}**
  incide sui tempi di esodo e quindi sui tempi di esposizione alle concentrazioni dei prodotti della combustione ed agli effetti termici dell'incendio e rappresenta la lunghezza efficace di una galleria dal punto di vista dell'esodo dei passeggeri nel

caso dell'evento incendio di una carrozza in galleria;

- **larghezza dei percorsi di esodo W'**
  incide sulla velocità di fuga e quindi sui tempi di esposizione alle concentrazioni dei prodotti della combustione ed agli effetti termici dell'incendio.

Indicatori di danno per l'Analisi di rischio base (ARB).

Di seguito sono definiti i tre indicatori di danno:

- **D_{Ch}**, rappresentativo del danno durante l'esodo in galleria, dovuto alla concentrazione del monossido di carbonio e di altri prodotti tossici, computati conservativamente raddoppiando il contributo dovuto al solo monossido di carbonio (la concentrazione dei fumi può essere convertita in densità ottica);
- **D_T**, rappresentativo del danno associato agli effetti della temperatura e dell'irraggiamento termico;
- **D_O**, rappresentativo del danno dovuto ad ipossia (scarsità di ossigeno).

L'approccio della ARB si basa su leggi empiriche ottenute da una regressione di una modellazione rigorosa del fenomeno che correlano gli indicatori agli elementi caratteristici della galleria rispetto ai quali tali parametri sono sensibili. Le espressioni dei parametri sopra citati sono le seguenti:

$$D_{Ch} = F_{Ch} \cdot \left[\left(80/S_g\right)^2 + \left(0{,}8/W'\right)^2 \right] \Big/ 2 + 0{,}03 \cdot L_{eff}/1000 \tag{4.4}$$

$$D_T = F_T \cdot \left[\left(80/S_g\right)^2 + \left(0{,}8/W'\right)^2 \right] \Big/ 2 \tag{4.5}$$

$$D_O = F_O \cdot \left[\left(80/S_g\right)^2 + \left(0{,}8/W'\right)^2 \right] \Big/ 2 \tag{4.6}$$

Le espressioni sopra riportate sono basate su ipotesi conservative, associate alla variazione degli indicatori di danno in relazione agli elementi caratteristici della galleria.

La condizione per cui l'ARB dimostra la necessità di effettuare l'ARE è che almeno uno degli indicatori di danno sopra definiti, D_{Ch}, D_T, D_O, risulti maggiore del valore limite normalizzato, pari a 0,3.

La condizione di accettabilità del danno si realizza nel caso in cui gli indicatori D_{Ch}, D_T, D_O, rimangano tutti inferiori al valore limite pari a 0,3. In altri termini il suddetto risultato corrisponde all'esito favorevole dell'ARB, compatibile con la soglia di accettabilità fissata.

Riferimenti bibliografici.

I valori soglia ed i parametri del modello deterministico dello scenario di danno considerato e delle corrispondenti conseguenze sui passeggeri sono tratti dal contesto internazionale normativo del settore (vedi riferimenti bibliografici sotto elencati):

- ISO/TR 13387:1999, Fire safety engineering - Part 1-9;
- ISO/DTS 13571 Life threat of fires - Guidance on the estimation of time available for escape using fire data;
- NFPA SFPE Handbook - Visibility, and human behaviour in fire smoke, T. Jin;
- NFPA SFPE Handbook - Toxicity assessment of combustion products, D.A. Purser;
- NFPA SFPE Handbook - Emergency movement, H.E. Nelson;
- NFPA SFPE Handbook - Heat release rate, V. Babrauskas;
- NFPA SFPE Handbook - Generation of heat and chemical compounds in fire, A. Tewarson;
- NIST Fire dynamic simulator - Technical reference guide, K. McGrattan;
- NIST Fire dynamic simulator - User's guide, K. McGrattan;
- NIST - Fire safety of passenger trains: Material evaluation (cone calorimeter), R.D. Peacock;
- NIST - Fire Safety of Passenger Trains: Application of Fire Hazard Analysis Techniques, Richard D. Peacock;
- NIST - Fire Safety of Passenger Trains: Evaluation of Fire Hazard Analysis Using Full Scale Passenger Rail Car Tests; Richard D. Peacock;
- University of Canterbury - Assessing the feasibility of reducing the grid resolution in FDS field modelling, N.M. Petterson;
- NIST - Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001, K. B. McGrattan, A. Hamins;
- NRC National Research Council Canada - Simulation of the dynamics of the fire for a section of the L.H. - La Fontaine Tunnel, A. Bounagui, A. Kashef, N. Benichou.

CAPITOLO 5

LE GALLERIE FERROVIARIE IN ESERCIZIO

5.1 LE GALLERIE FERROVIARIE PIÙ LUNGHE DEL MONDO

Come accennato in precedenza, ogni lunga galleria ferroviaria deve essere considerata a pieno titolo come una grande opera dell'ingegneria e dunque come l'espressione del risultato congiunto dei tre fattori della funzionalità, della sicurezza e della fattibilità.

La combinazione di questi tre macro-elementi non può che realizzarsi caso per caso in funzione del sistema complessivo all'interno del quale essa stessa si sviluppa. In altre parole, ogni grande opera segue logiche proprie, spesso sviluppate in relazione prioritaria a se stessa.

Appare dunque interessante oltreché importante dare una visione di massima delle gallerie ferroviarie esistenti o in fase di realizzazione, che per la loro lunghezza rientrano fra le prime cinque nel mondo, caratterizzandone gli aspetti principali. Esse sono:

- la galleria di base del San Gottardo;
- la galleria del Seikan;
- la galleria sotto la Manica;
- la galleria base del Lotschberg;
- la galleria di Guadarrama.

5.1.1 La galleria di base del San Gottardo

La galleria di base del San Gottardo con i suoi 57 km rappresenta la galleria più lunga al mondo. Il tunnel, che si trova in territorio svizzero, è ancora in fase di realizzazione e la sua data di apertura è prevista per il 2015 (Figura 5.1). La linea ferroviaria che comprende la galleria del San Gottardo collegherà Milano con Zurigo.

Il consiglio federale svizzero ha approvato nel 1995 un progetto di massima che prevede un sistema di gallerie a due tubi unidirezionali a semplice binario, senza cunicolo di servizio, distanti 40 m l'uno dall'altro, e collegati ogni 325 m tramite cunicoli di collegamento.

Grazie a due doppi cambi di corsia è possibile far passare i treni da una galleria all'altra, ciò può essere necessario nel caso di lavori di manutenzione o in caso di eventi accidentali.

Le aree per il cambio corsia si trovano nelle stazioni multifunzionali di Sedrun e di Faido (Figura 5.2). Qui si trovano anche parte delle installazioni di ventilazione, i locali tecnici con gli impianti di sicurezza, e due stazioni di soccorso, le quali sono collegate direttamente l'una con l'altra mediante cunicoli separati. Le stazioni di soccorso sono concepite per l'arresto di emergenza di un treno, servono però anche come vie di fuga e di evacuazione.

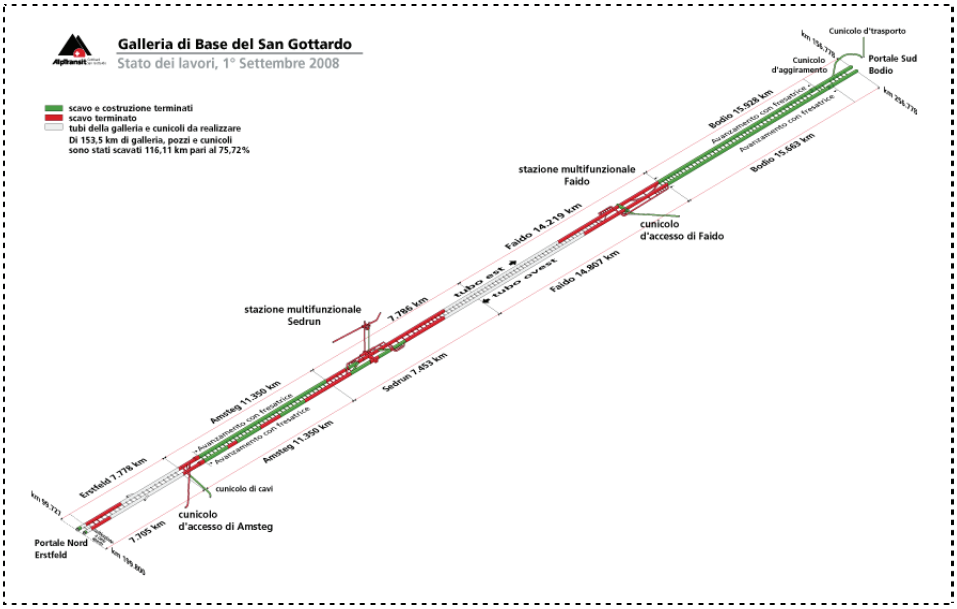

Figura 5.1 - Galleria di base del San Gottardo. Stato dei lavori al 1° settembre 2008.

Sul percorso di salvataggio verso l'altra galleria non si devono attraversare binari né utilizzare scale o ascensori. Le stazioni di soccorso e i relativi cunicoli laterali e di collegamento sono ventilati con aria esterna in presenza di eventi anomali, mentre nell'altro tubo il fumo viene aspirato. Una leggera sovrappressione è sufficiente per mantenere libera da fumo la via di fuga nell'altra galleria. Partendo dalla stazione di soccorso, un treno di salvataggio trasporta i passeggeri fuori dalla galleria. Nel caso in cui un treno si arresti fuori dalla stazione di soccorso, i viaggiatori possono utilizzare i cunicoli trasversali come via di fuga verso la galleria adiacente.

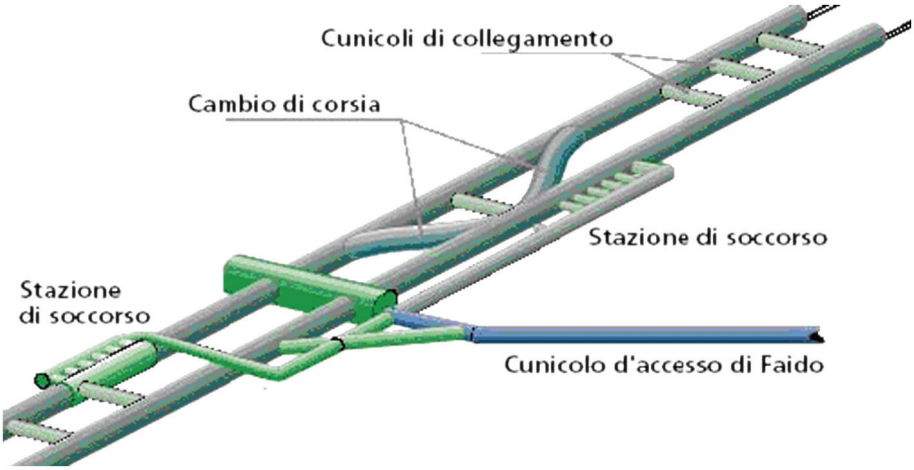

Figura 5.2 - Stazione multifunzionale di Faido (San Gottardo).

5.1.2 La galleria del Seikan

La galleria del Seikan è lunga 53,85 km e una parte di questa (23,30 km) si trova 240 m sotto il livello del mare costituendo così la linea ferroviaria più profonda al mondo.

Il tunnel viaggia sotto il Tsugaru Strait, connettendo l'isola giapponese di Honshu con l'isola di Hokkaido e fa parte della linea ferroviaria giapponese di Kaikyo.

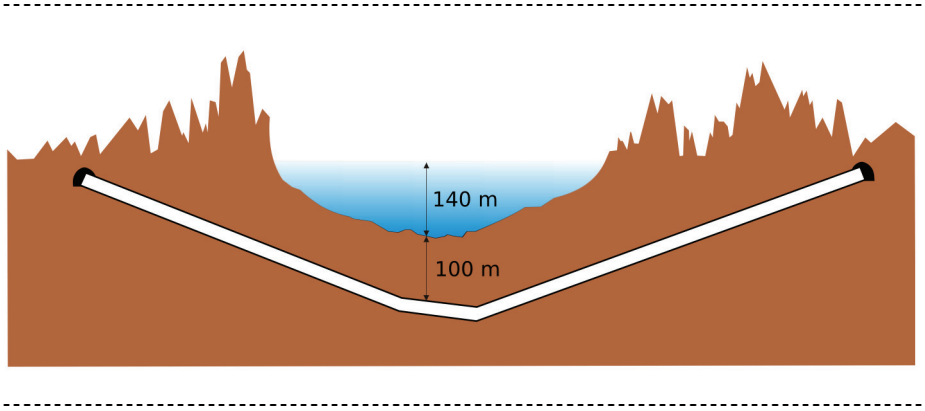

Figura 5.3 - Profilo altimetrico del Seikan tunnel.

Attualmente è il tunnel ferroviario più lungo nel mondo, almeno fino a quando il tunnel svizzero di base del San Gottardo non verrà completato. Il tunnel di Seikan rappresenta una delle più grandi imprese ingegneristiche del ventesimo secolo. Esso è costituito da un'unica galleria con doppio binario, possiede due stazioni di emergenza, e il suo diametro è di 9,6 m (Figura 5.3).

Il tunnel fu scavato simultaneamente da settentrione e da meridione. Le porzioni di terra del tunnel furono eseguite con tecniche di tunnelling di montagna tradizionali, realizzando in questi tratti un solo tunnel principale. Per i 23,3 km della porzione sottomarina, furono invece scavati tre fori rispettivamente con diametri in aumento: un tunnel pilota iniziale, un tunnel di servizio e il tunnel principale (Figura 5.4). Il tunnel di servizio è collegato al tunnel principale con una serie di connessioni trasversali, distanti tra 600 e1000 m.

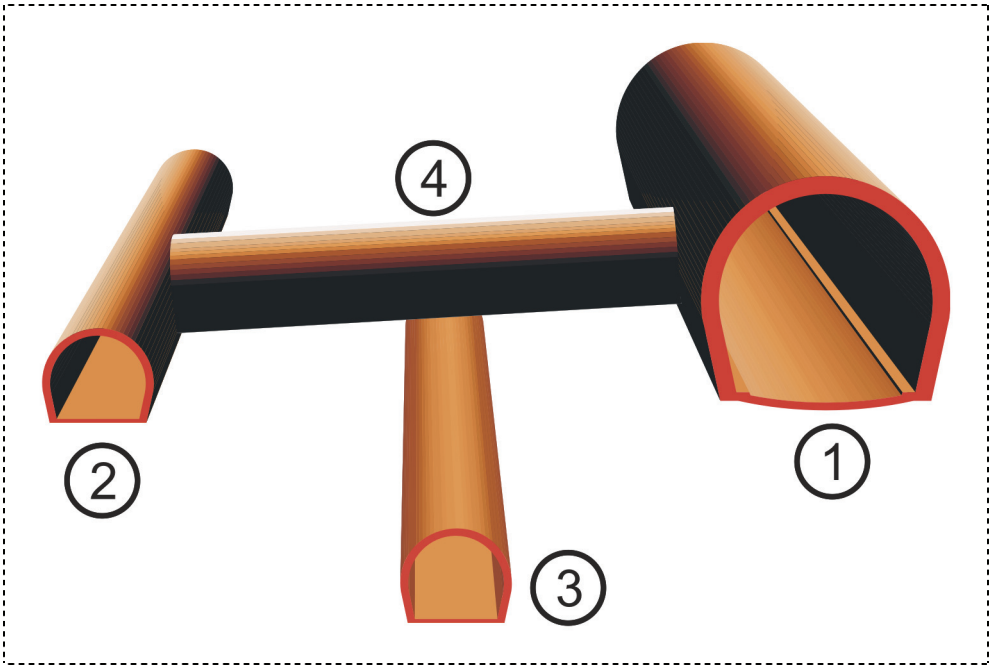

Figura 5.4 - Sezioni tipo del tunnel di Seikan. (1) tunnel principale, (2) tunnel di servizio, (3) tunnel pilota, (4) galleria trasversale di connessione.

Le stazioni servono come punti di fuga di emergenza. Nell'evento di un fuoco o altro disastro, ambo le stazioni offrono la sicurezza equivalente di un tunnel molto più corto.

L'efficacia delle aste di fuga localizzate alle stazioni di emergenza è migliorata da: ventilatori per l'estrazione dei fumi; videocamere per guidare i passeggeri sui percorsi più sicuri; sistemi di allarme termali (ad infrarossi) e spruzzatori di acqua.

5.1.3 La galleria sotto la Manica

La galleria sotto la Manica, canale che separa l'Inghilterra dalla Francia, detto anche Eurotunnel dal nome della società che lo gestisce, costituisce il più lungo tunnel sottomarino del mondo. Il tunnel è lungo 50 km, 38 Km dei quali corrono sotto il mare, e collega Folkestone, in Inghilterra, con Calais, in Francia. Il tunnel si compone di tre gallerie, due ferroviarie e una di servizio.

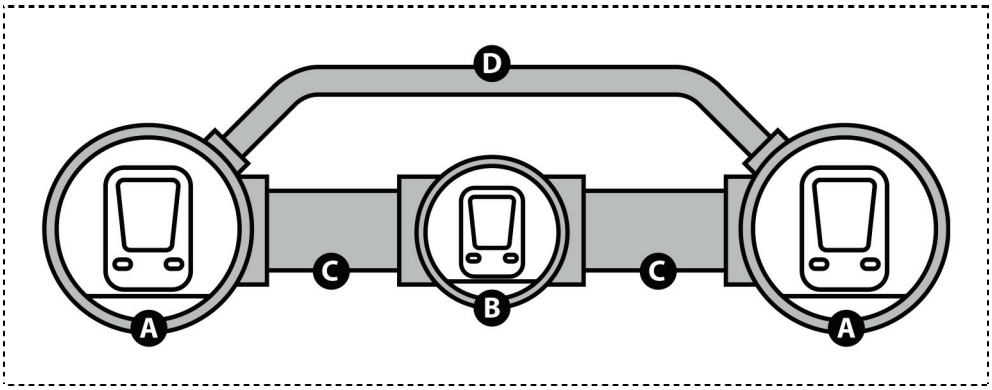

Figura 5.5 - Sezioni tipo del tunnel sotto la manica.

Le gallerie furono scavate ad una profondità di 45 m sotto il fondale marino. Le due gallerie ferroviarie (A) hanno un diametro di 7,6 m e sono distanziate fra loro di circa 30 m; tra le due vi è una galleria di servizio (B) di 4,8 m di diametro; da essa ogni 375 m circa partono delle gallerie di intersezione (C) con i due tunnel ferroviari. Il tunnel di servizio ha il duplice compito di fornire accesso agli operai addetti alla manutenzione e di fornire una via di fuga sicura in caso di emergenza. I due tunnel ferroviari sono inoltre collegati direttamente ogni 250 m da condotti per lo sfogo della pressione (D) che passano sopra il tunnel di servizio senza unirsi ad esso; questi condotti servono ad alleviare l'effetto pistone dovuto alla compressione dell'aria provocata dal transito del treno in corsa (Figura 5.5). Per le auto, i pullman e i camion il servizio navetta del tunnel funziona come un'autostrada semovibile; i

mezzi salgono su una carrozza e scendono all'altra estremità, dopo un tragitto di 35 minuti. Le navette sono trainate da locomotive che possono raggiungere i 160 km/h.

La società Eurotunnel offre complessivamente quattro tipi di servizio: i treni passeggeri Eurostar ad alta velocità, i treni navetta per passeggeri, autoveicoli, camion e autobus con autisti a bordo, i treni navetta che trasportano camion su vagoni aperti senza gli autisti a bordo dei mezzi, i treni merci convenzionali che trasportano le merci in vagoni o container.

5.1.4 La galleria base del Lotschberg

Il tunnel di base del Lotschberg è lungo 34,6 km e porta da Frutigen, nel Kandertal (cantone di Berna) a Raron, nella valle del Rodano (cantone del Vallese). Dopo la sua inaugurazione del 2007, il nuovo tunnel per treni ad alta velocità costituisce, insieme al tunnel del Sempione, il primo collegamento transalpino veloce nord-sud. Il tunnel ferroviario è costituito da un doppio condotto con corsia unica a direzioni separate (Figura 5.6).

Figura 5.6 - Sezione di un condotto del tunnel ferroviario del Lotschberg.

I condotti sono collegati ogni 333 m da gallerie trasversali cosicché ogni condotto può essere adibito come galleria di soccorso per l'altro condotto. In situazioni difficili le gallerie trasversali possono anche essere aperte a mano e resistono ad un incendio di 90 minuti.

Entrambi i condotti dispongono di un'alimentazione di corrente separata, di un'illuminazione di emergenza e di un sistema di aerazione indipendente.

5.1.5 La galleria di Guadarrama

Nel programma generale della rete ferroviaria ad Alta Velocità spagnola è prevista una connessione tra Madrid e Segovia. La tratta deve attraversare la Sierra di Guadarrama, al centro della Spagna, con una galleria lunga e profonda sotto il parco nazionale Manganare.

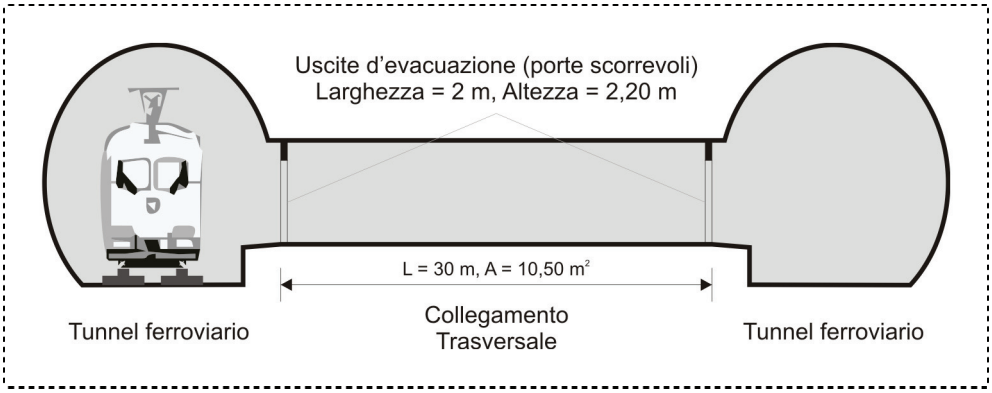

Figura 5.7 - Sezione trasversale del tunnel ferroviario Guadarrama.

Il tunnel ferroviario è costituito da una doppia canna, ciascuna del diametro di circa 10 m (Figura 5.7), avente una lunghezza di 26,5 km. La configurazione del tunnel prevede diverse infrastrutture complementari come gallerie di connessione ogni 250 m, camere d'emergenza con relative uscite all'esterno, rifugi per passeggeri e centrali di ventilazione.

5.2 LE GALLERIE FERROVIARIE PIÙ LUNGHE D'ITALIA

Relativamente alle gallerie italiane esistenti o in fase di realizzazione che per la loro lunghezza rientrano fra le prime tre ricordiamo:

- la galleria del Sempione (linea Milano - Parigi);
- la galleria di Vaglia (linea Bologna - Firenze);
- la galleria dell'Appennino (linea Bologna - Firenze).

Si citano, inoltre, ulteriori due gallerie ancora in fase di progettazione:

- la galleria di base del Brennero, con una lunghezza di 56 km, che collegherà Innsbruk (Austria) con Fortezza (Italia) e che quindi interesserà il Trentino Alto Adige;
- la galleria di base del Monte Ambin, con una lunghezza di 52 km, che collegherà Lione (Francia) con Torino (Italia).

5.2.1 La galleria del Sempione

Il tunnel del Sempione (Figura 5.8) misura 19,8 km e mette in comunicazione la val d'Ossola, in Italia, con l'Alta valle del Rodano, in Svizzera, passando sotto il monte Leone.

Figura 5.8 - L'ingresso del tunnel del Sempione a Iselle.

All'epoca della sua costruzione era il tunnel più lungo al mondo. Il tunnel è composto da due gallerie parallele, a semplice binario, distanti fra loro 17 m e messe in comunicazione con cunicoli trasversali.

Quella più ad est, detta numero 1, venne completata nel 1906, l'altra, scavata inizialmente solo in piccola sezione venne allargata più tardi per posare il secondo binario. Per dare incrocio ai treni, prima del compimento della galleria numero 2, venne costruita quasi a metà lunghezza, presso il confine italo-svizzero, una stazione di circa 500 m di lunghezza.

5.2.2 La galleria di Vaglia

La galleria di Vaglia, lunga 18,7 km, è la più lunga delle nove gallerie della tratta Bologna-Firenze. Essa è formata da una galleria naturale con imbocco a nord a "becco di flauto" lunga 16,7 km e, nella parte finale, a sud da una galleria artificiale lunga 1,8 km.

Dall'imbocco sud, una galleria di servizio lunga 10 km corre in parallelo alla galleria di linea con cui è collegata ogni 250 m tramite bypass pedonali per consentire, durante l'esercizio, le attività di manutenzione e l'accesso immediato alle aree di soccorso.

La galleria è ancora in fase di realizzazione e l'apertura è prevista nei prossimi anni.

5.2.3 La galleria dell'Appennino

La galleria dell'Appennino, lunga 18,5 km, venne aperta nel 1934. A metà della galleria è stato realizzato un "camerone" dal quale si staccano due gallerie secondarie che ospitano i binari utilizzati per ricoverare i treni più lenti che danno precedenza ai treni più veloci. Questi binari lunghi 500 m hanno un particolare andamento planimetrico arcuato. Anche questa galleria si trova sulla tratta che collega Bologna con Firenze.

5.3 SINTESI DEI PRINCIPALI ACCADIMENTI INCIDENTALI

Per valutare le condizioni connesse ad un incidente generico ed avere anche delle indicazioni sulle eventuali iniziative che potrebbero ridurre notevolmente le conseguenze di un fatto drammatico è sicuramente interessante studiare la casistica dei principali incidenti del passato avvenuti in galleria.

Nell'ambito delle sole gallerie ferroviarie o metropolitane, escludendo dunque le galleria stradali, dal 1940 ad oggi possono contarsi 27 incidenti seri, sulla base delle indicazioni di diversi autori. Un elenco dettagliato di questi incidenti, ognuno corredato da una descrizione

particolareggiata è dato in [3].

Questa veduta d'insieme non è completa e non esiste un criterio per l'uniforme selezione di questi incidenti, tranne per il fatto che sono tutti avvenuti in gallerie ferrate.

Una stima approssimata considera che, in totale, circa 1400 persone hanno perso la vita in questi incidenti identificati. Dalle informazioni su ogni incidente, sembra che circa il 90% di queste si trovava a bordo del treno durante il decesso o comunque all'interno dell'area della stazione. Solo la rimanente percentuale ha perso la vita nel tentativo di allontanarsi dal luogo dell'incidente.

La casistica riporta che anche nei casi in cui sia stato l'incendio la causa maggiore dei decessi, la maggior parte delle persone ha perso la vita senza riuscire a scendere dal proprio convoglio. Questo pone l'accento sul fatto che **l'evacuazione del treno verso il tunnel è importante almeno quanto l'evacuazione dal tunnel verso un luogo sicuro**.

5.3.1 I casi reali d'incendio in galleria

L'incidente più serio della storia è avvenuto in Italia nel 1944, nel tunnel delle Armi a Balvano, a sud di Napoli, dove 400 ÷ 500 persone persero la vita per via dell'esposizione diretta a forti dosi di monossido di carbonio sprigionato dal fumo di due motori a vapore.

E' bene evidenziare che in questo caso non si è trattato di un vero e proprio incidente quanto di una serie di malaugurate circostanze che hanno bloccato il treno ed i suoi due motori a vapore all'interno della galleria.

Le due motrici a vapore erano poste alla stessa estremità e ciò non ha consentito una rapida inversione di marcia. Infatti, soltanto dopo una discreta quantità di tempo il treno fu fatto scivolare all'indietro verso l'uscita posteriore (la tratta era in salita), ma la maggior parte dei passeggeri che alloggiavano disordinati sugli spazi disponibili dei vagoni merci erano già morti (non si trattava infatti di un treno passeggeri ma di un treno merci occupato semi-clandestinamente).

Pur essendo quello di Balvano un fatto singolare ed assolutamente irripetibile la combustione e la formazione di fumo, causa della morte di quegli uomini di malasorte, può essere opportunamente comparata a quella che si avrebbe oggi nell'incendio completo di un moderno vagone passeggeri.

Fra gli altri incidenti seri, vale la pena di menzionare l'incendio della metropolitana di

Baku nel 1995, che ha contato 289 decessi, e l'incendio sulla funicolare di Kitzsteinhorn in Austria nel 2000 che ha contato 155 morti.

Entrambi i tunnel scenario di questi due gravi incidenti erano stati costruiti con una sezione trasversale molto piccola, circa 10 m^2 per Kitzsteinhorn e circa 28 m^2 per la metro di Baku, e questa loro comune caratteristica sembra essere stata la causa principale della gravità delle conseguenze perché alla maggior parte delle persone decedute non è stato possibile abbandonare il proprio convoglio.

In parte, questo fu causato da problemi con l'apertura delle porte, ma in ogni caso troppo poco tempo intercorse tra l'innesco dell'incendio ed il suo sviluppo verso condizioni estreme. Una sezione trasversale più estesa avrebbe potuto fornire un tempo più adeguato per l'evacuazione e per gli interventi di soccorso prima che il calore ed il fumo divenissero insostenibili.

Un altro incidente serio accadde nel 1972 nel tunnel di Hokuriku (13,9 km a doppio binario) con l'incendio del vagone ristorante di un treno serale. Il treno fu fermato a metà strada nel tunnel per disconnettere il carro incendiato e proseguire con la procedura attivata, ma dopo lo stop il convoglio non fu più capace di ripartire. Quel treno trasportava più di 700 passeggeri e 30 di questi persero la vita. Non erano presenti, all'interno del tunnel, sufficienti equipaggiamenti in termini di ventilazione ed illuminazione e questo fu pesantemente criticato dopo l'incidente.

Esistono tuttavia anche dei casi in cui i passeggeri sono tranquillamente riusciti a mettersi in salvo all'esterno del tunnel una volta abbandonato il convoglio in panne, sia nel caso di singole gallerie a doppio binario che nel caso di sistemi galleria a doppia canna.

L'incidente a San Francisco del 1979 mostra che anche la configurazione di tunnel gemelli a singola canna con frequenti collegamenti trasversali non è una sufficiente garanzia nei confronti della sicurezza degli evacuanti in caso d'incendio e non sempre fornisce le condizioni migliori per l'intervento delle squadre di soccorso. Anche la presenza di un tunnel di servizio, in quell'occasione, non si è infatti rivelata sufficiente a garantire la sicurezza: una persona della squadra di soccorso perse la vita e molti altri individui rimasero gravemente feriti.

Gli incidenti che hanno avute le peggiori conseguenze in termini del numero di vittime, si sono avuti nei tunnel a singola canna (singolo o doppio binario) con ridotta o stretta sezione trasversale. In questi casi, una più fitta rete di percorsi di sicurezza trasversali potrebbe non

essere la soluzione al problema, ma potrebbe salvare qualche vita in più.

In molti casi è stato un problema di natura tecnica a bloccare il treno in galleria, in altri l'uso improprio del freno di emergenza. Quest'ultima circostanza sarebbe potuta evitarsi se il conducente avesse potuto annullare l'azione dei passeggeri sul freno o se questi fossero stati istruiti a non usare il freno di emergenza all'interno di un tunnel.

Un altro elemento che sembra essere predominante per l'influenza che può avere sulle conseguenze è la posizione di arresto del convoglio all'interno del tunnel rispetto all'imbocco delle uscite di emergenza.

Bisogna notare che, in tutti quei casi in cui il treno si ferma senza la precisa volontà del macchinista, la posizione di arresto è designata esclusivamente dal caso. Di conseguenza, per garantire la sicurezza, è necessario che i tempi per l'inizio ed il regolare svolgimento di un'eventuale evacuazione siano piuttosto brevi e che la distanza massima per giungere ad un luogo sicuro sia sempre sufficientemente breve.

A tutti i casi più gravi corrisponde, infatti, la condizione di arresto del treno in galleria senza il controllo della posizione dei vagoni passeggeri rispetto all'imbocco dei percorsi d'emergenza. In tutti gli altri casi d'incendio dove invece la fermata all'interno del tunnel si è configurata come intenzionale è sempre stato possibile evacuare gli occupanti in sicurezza lungo i percorsi offerti dalla data galleria, come ad esempio per gli incidenti dell'Eurotunnel nel 1996 e di San Francisco nel 1979 in cui tutta la popolazione esposta è riuscita a realizzare il proprio esodo lungo la canna parallela.

5.3.2 Altri tipi di incidenti gravi in galleria

Oltre agli eventi incidentali causati direttamente dall'incendio, un numero circa equivalente di incidenti gravi si è verificato per cause di natura differente. La maggior parte di questi incidenti può classificarsi come di seguito:

- collisione fronte-coda tra due treni (Batignolles 1921, Torre 1944, Mexico City 1975);
- collasso strutturale del tunnel (Vierzy 1972);
- collisione con la fine della linea o con altri treni (Moorgate 1975, Gare de Lyon 1988);
- incendio all'interno dell'area di stazione (King's Cross);
- panico tra la folla alle porte della stazione (Minsk 1999).

La maggior parte di questi incidenti non ha avuto un rapporto di causa - effetto con la tipologia di tunnel nel quale esso è avvenuto. Tuttavia è probabile che le operazioni di soccorso abbiano invece subito tale condizionamento.

5.3.3 Riepilogo dei casi gravi

Si riporta di seguito una tabella sintetica con la descrizione dei casi più gravi d'incidente avvenuti dalla storia delle ferrovie ad oggi.

Data	Tunnel	Descrizione dell'incidente	Caratteristiche del Tunnel	Morti / Feriti Danni
Settembre 2008	Eurotunnel UK FRANCIA	incendio al sistema di frenaggio di un camion propagatosi su altri due mezzi pesanti, a 5 km dalla sponda francese	50 km doppia canna singolo binario con tunnel di servizio e accessi ogni 375 m	14 feriti di cui 6 intossicati e 8 lievemente feriti dallo scoppio dei vetri
Agosto 2006	Eurotunnel UK FRANCIA	incendio al motore di un camion	50 km doppia canna singolo binario con tunnel di servizio e accessi ogni 375 m	0 / 0
Febbraio 2003	Jungangno Station, Daegu SUD COREA	incendio doloso di un malato mentale	stazione metropolitana su 3 livelli	192 morti 148 feriti
Agosto 2001	Howard Street Tunnel, Baltimora USA	deragliamento e incendio di un treno merci	2,5 km singola canna singolo binario linea sviluppata sotto la città	0 / 0
Novembre 2000	Kitzsteinhorn AUSTRIA	incendio della parte posteriore della cabina di pilotaggio	3,4 km funicolare singola canna con inclinazione di 43° sull'orizzontale	155 morti su un totale di 167 passeggeri
Agosto 2000	Notre Dame de Lorette, Parigi FRANCIA	deragliamento e cappottamento all'ingresso della stazione probabilmente a causa di alta velocità su curva stretta	linea 12 metropolitana curva con raggio di 52 m	24 feriti di cui 10 in gravi condizioni
Agosto 1999	U-bahn line 15, Colonia GERMANIA	collisione fronte-coda all'interno della stazione	stazione metropolitana	67 feriti di cui 7 in gravi condizioni
Maggio 1999	Nyamiha Station, Minsk RUSSIA	panico all'ingresso della stazione tra una folla reduce da un concerto che cercava di riparo da una violenta grandinata	ingresso stazione metropolitana	52 morti e più di 150 feriti su un totale di 2000 passeggeri

Data	Tunnel	Descrizione dell'incidente	Caratteristiche del Tunnel	Morti / Feriti Danni
Maggio 1999	Salerno ITALIA	incendio doloso di un gruppo di tifosi in ritorno da una trasferta, probabilmente causato da una smoke bomb	~ 10 km	4 morti e 9 feriti su un totale di 1100 passeggeri
Novembre 1996	Eurotunnel UK FRANCIA	incendio di un autocarro trasportato con HRR di picco pari a circa 100 MW	50 km doppia canna singolo binario con tunnel di servizio e accessi ogni 375 m	0 / 0
Ottobre 1995	Baku Metro AZERBAIJAN	incendio dovuto ad un arco elettrico sulla penultima di una sequenza di 5 carrozze in pieno carico, a circa 2,2 km dalle stazioni probabile disfunzione/assenza dei collegamenti trasversali tra le canne	metropolitana tunnel a doppia canna	289 morti di cui circa 245 sul treno e 40 nel tunnel + 265 feriti il 95% delle persone che hanno abbandonato il convoglio sono riuscite a salvarsi
Dicembre 1994	Summit Tunnel UK	deragliamento e incendio di un vagone merci che trasportava gasolio	2,6 km singola canna doppio binario	0 / 0 chiusura del tunnel per diversi mesi
Dicembre 1991	Severn Tunnel UK	collisione fronte-coda a causa di un guasto nel sistema di segnalamento	6,8 km singola canna doppio binario tracciato sottomarino	100 feriti lievi su un totale di 291 passeggeri
Aprile 1991	Hirschen Graben Tunnel, Zurigo SVIZZERA	incendio su una carrozza e treno bloccato dal freno di emergenza con la contemporanea presenza di un altro convoglio sull'altro binario	1,3 km singola canna doppio binario A = 70 m^2	0 / 0 su un totale di 50 + 90 passeggeri
Giugno 1988	Gare de Lyon, Parigi FRANCIA	rottura dei freni e collisione con un treno in sosta	stazione metropolitana	59 morti 32 feriti
Novembre 1987	King's Cross Station, Londra UK	incendio di una scala mobile	stazione metropolitana su 5 livelli	31 morti
Dicembre 1984	Galleria San Benedetto ITALIA	attentato terroristico, bomba sulla tratta Firenze - Bologna	18,5 km singola canna doppio binario	17 morti 120 feriti
Aprile 1980	U-Bahn Amburgo GERMANIA	incendio di una sedia propagatosi sull'intera carrozza in circa 9 minuti	metropolitana	3 feriti tra i vigili del fuoco
Gennaio 1979	BART, San Francisco USA	incendio	5,9 km metropolitana doppia canna gemellata con tunnel di servizio	1 morto 58 feriti

Data	Tunnel	Descrizione dell'incidente	Caratteristiche del Tunnel	Morti / Feriti Danni
Maggio 1977	Saint Julien FRANCIA	collisione	< 1 km	1 morto tra i macchinisti
Ottobre 1975	Metro Mexico City MESSICO	collisione fronte-coda tra un treno in corsa ed uno fermo per la chiamata del freno di emergenza	metropolitana	34 morti
Febbraio 1975	Moorgate, Londra UK	collisione con la fine della linea per cause sconosciute	metropolitana capolinea	43 morti 74 feriti
Novembre 1972	Hokuriku Tunnel GIAPPONE	incendio sulla carrozza ristorante con arresto e tentativo di isolamento non portato a termine a causa della rottura del sistema di illuminazione del tunnel	13,9 km singola canna doppio binario costruito nel 1962	30 morti diversi feriti
Giugno 1972	Vierzy Tunnel FRANCIA	collasso strutturale	0,8 km singola canna doppio binario costruito nel 1862	108 morti 240 feriti
Marzo 1971	Crozet Tunnel, Virginia USA	collisione e incendio	< 1 km singola canna doppio binario	2 morti tra i macchinisti
Febbraio 1971	Vranduk Tunnel JUGOSLAVIA	incendio di una locomotiva diesel-elettrica propagatosi anche sulle altre carrozze	1,6 km singola canna singolo binario	34 morti su circa 200 passeggeri
Novembre 1979	Simplon Tunnel SVIZZERA ITALIA	incendio su una carrozza disconnessa efficacemente con sosta presso una stazione di emergenza	19,8 km singola canna doppia canna	0 / 0
Giugno 1958	Shepards Bush Holland Park, Londra UK	incendio a causa di un corto circuito elettrico	metropolitana	1 morto 51 feriti
Marzo 1944	Tunnel delle Armi ITALIA	avvelenamento da esposizione prolungata al monossido di carbonio	~ 1-1,5 km singolo binario	426 morti 60 feriti
Gennaio 1944	Torre SPAGNA	collisione e incendio	n.d.	91 morti
Ottobre 1921	Batignolles, Parigi FRANCIA	collisione fronte-coda e incendio	1 km singola canna doppio binario	più di 28 morti

Tabella 5.1 - Gli incidenti più seri della storia delle gallerie ferroviarie.

Per completezza, si riporta di seguito un sommario dei principali avvenimenti d'incendio avvenuti all'interno di tunnel stradali. Per questa categoria di incidenti e tunnel, una trattazione più numerosa e dettagliata è stata fatta da Carvel & Marlair [4].

Data	Tunnel	Causa dell'incendio	Danni al tunnel	Morti / Feriti
Maggio 1949	Holland L = 2550 m	crollo di carico da un 1 HGV con 11 ton di CS_2	gravi danni per 200 m	66 feriti
Agosto 1978	Velsen L = 770 m	tamponamento tra 2 HGV e 4 automobili	gravi danni per 30 m	5 morti 5 feriti
Luglio 1979	Nihonzaka L = 2045 m	tamponamento tra 4 HGV e 2 automobili	gravi danni per 1100 m	7 morti 2 feriti
Aprile 1980	Kajiwara L = 740 m	collisione con muro laterale e cappottamento di 1 autotreno con 3600 litri di vernici	danni per 280 m	1 morto
Aprile 1982	Caldecott L = 1083 m	tamponamento tra 1 automobile, 1 bus, 1 HGV, 1 autocisterna con 33000 litri di petrolio	gravi danni per 580 m	7 morti 2 feriti
Febbraio 1983	Fréjus L = 12868 m	rottura della scatola del cambio di 1 HGV caricato con materiali plastici	gravi danni per 200 m	0 / 0
Settembre 1984	Felbertauern L = 5130 m	bloccaggio dei freni di 1 bus	danni al soffitto ed alle attrezzature per 100 m	0 / 0
1987	Gumefens L = 340 m	collisione di 1 HGV	lievi danni	2 morti
1993	Serra a Ripoli L = 442 m	collisione tra 1 automobile e 1 HGV caricato con rulli di carta	gravi danni ai fianchi della galleria	4 morti 4 feriti
Luglio 1994	San Gottardo L = 16322 m	attrito tra ruote e piano di carico di 1 HGV con rimorchio caricato con 750 biciclette avvolte in carta e plastica	gravi danni al soffitto, al pavimento ed alle attrezzature per 50 m tunnel chiuso per 2,5 giorni	0 / 0
Febbraio 1996	Isola delle Femmine L = 150 m	collisione di 1 bus con 1 autocisterna carica di gas liquido, ferma per una precedente collisione	danni alle pareti ad al sistema di illuminazione	5 morti, 34 feriti
Marzo 1999	Monte Bianco L = 11600 m	incendio spontaneo su 1 HGV	gravi danni per 900 m tunnel chiuso per tre anni	39 morti
Maggio 1999	Tauern L = 6400 m	collisione multipla per la presenza di lavori di manutenzione	dispersione di vernici tunnel chiuso per tre mesi	12 morti
Luglio 2000	Seljestads L=1272 m	collisione multipla e incendio di un serbatoio	gravi danni	6 feriti
Ottobre 2001	San Gottardo L = 16322 m	collisione tra 2 HGV	gravi danni per 200m danni per 700m tunnel chiuso per due mesi	11 morti

Data	Tunnel	Causa dell'incendio	Danni al tunnel	Morti / Feriti
Novembre 2003	Flöfjell L = 3100 m	collisione di 1 automobile con propagazione delle fiamme lungo i fianchi della galleria	lievi danni	1 morto
Giugno 2005	Fréjus L = 12868 m	incendio del serbatoio di 1 HGV caricato con pneumatici	10 km di attrezzature danneggiate	2 morti 1 ferito

Tabella 5.2 - Gli incendi più seri della storia dei tunnel stradali.

Come può facilmente dedursi dalle tabelle precedenti il rischio più alto per la vita umana si ha negli incidenti ferroviari piuttosto che negli incidenti stradali.

D'altro canto si può notare che gli incidenti nei tunnel stradali sono stati di gravità crescente negli anni. Questo è dovuto, almeno in parte, all'incremento di domanda di trasporto di beni civili sulle infrastrutture stradali e di conseguenza attraverso i tunnel.

Si è stimato che nel periodo tra il 2000 ed il 2010, il traffico pesante su strada aumenterà tra il 40% ed il 60% [4]. I dati riportati diventano dunque molto più significativi se si considera che il trasporto di beni civili ed il conseguente transito di mezzi pesanti è in costante crescita ed aumenterà sicuramente in futuro.

Infatti, il traffico il tunnel del Monte Bianco sta aumentando e ritornerà presto al livello del periodo precedente a quello dell'incidente del 1999.

Un fattore comune a tutti gli eventi catastrofici in galleria è la propagazione del fuoco attraverso un elevato numero di veicoli, poiché ciò rende molto difficile l'intervento delle squadre di soccorso impedendo ad essi di avvicinarsi alle fiamme per spegnere il fuoco.

Come già visto, il parametro più comune per descrivere la quantità di energia rilasciata e la sua distribuzione nel tempo è l'HRR (generalmente espresso in kW o MW).

Ingason valutò le percentuali di liberazione di calore (basandosi sulle informazioni a sua disposizione) studiando i più recenti e grandi incendi della rete di trasporto europea [6]. La Tabella 5.3 riporta un sommario di questi risultati con l'aggiunta dei dati stimati da Bettellini per l'incendio del San Gottardo. Le stime variano da più di 100 MW a 400 MW.

L'incendio del tunnel del Fréjus del 4 Giugno 2005 ha posto l'attenzione sul traffico merci su strada attraverso le Alpi con la conseguente consapevolezza che una potenziale soluzione sarebbe quella di trasferire parte di questo traffico su binari [7], riducendo

significativamente il carico di incendio sulle infrastrutture stradali.

Incidente	Veicoli coinvolti	Energia rilasciata [GJ]	HRR di picco [MW]	Danni al tunnel	Morti / Feriti
Eurotunnel	10 HGV	2200	370	danni al soffitto	30 feriti
Monte Bianco	14 HGV 9 automobili	5000 ÷ 7000	380	chiuso per tre anni	39 morti
Tauern	16 HGV 24 automobili	4000 ÷ 4500	300 ÷ 400	chiuso per tre mesi	12 morti
San Gottardo	13 HGV 10 automobili	1400 ÷ 2700	più di 100	chiuso per due mesi	11 morti

Tabella 5.3 - Stima dell'Energia e della Potenza rilasciata per incendi di autotreni [6,7].

Il trasporto di beni civili su mezzi pesanti è la principale causa della drammaticità degli incendi visti. Questo fatto pone l'attenzione sulla nuova metodologia da seguire. Bisogna cioè comprendere correttamente il carico di incendio di questi automezzi nelle loro condizioni di esercizio per definire validamente il rischio incendio in galleria, sia essa stradale o ferroviaria.

5.3.4 Considerazioni sugli incendi delle Torri Gemelle del 2001

Potrebbe essere di interesse valutare il comportamento degli incendi di Ground Zero conseguenti all'attentato del 11 settembre 2001, poiché per le date circostanze, lo sviluppo di questi eventi si avvicina molto a ciò che realmente può avvenire all'interno di un tunnel.

Assumendo la curva RWS-UNI-11076 come modello di evoluzione delle temperature è perfettamente lecito, anzi probabilmente errato per difetto, ammettere la presenza di temperature superiori ai 1300 °C.

All'interno dei piani sotterranei adibiti a parcheggio del World Trade Center, erano presenti centinaia di autoveicoli, che da soli avevano il potenziale per sviluppare ed alimentare incendi colossali (serbatoi di benzina e olii combustibili, lubrificanti e materiali plastici derivati dal petrolio). Oltre a questi, si sono poi aggiunti, in particelle di dimensioni anche molto piccole, centinaia di tonnellate di materiale combustibile sotto forma di mobili, archivi, rivestimenti, materiali per edilizia e di servizio. Il tutto è stato infine ricoperto da uno strato di polveri e macerie che hanno garantito l'isolamento dall'atmosfera e quindi la ridotta

dispersione del calore.

Il quadro, già di per sé catastrofico, è stato ulteriormente reso drammatico dal tiraggio naturale di aria consentito dai tunnel presenti sotto le macerie, che hanno consentito condizioni ideali per gli incendi. Nonostante l'uso di tecniche avanzate di telerilevamento delle temperature che hanno guidato le squadre di spegnimento verso i punti di maggior pericolo, le temperature sotto lo strato di macerie si sono mantenute per settimane attorno ai 600-800°C.

Figura 5.9 - Ingresso del Khuntan Tunnel in Thailandia, lungo 1352 m.

CAPITOLO 6

EFFETTI DELL'INCENDIO SULLA VITA UMANA

6.1 INTRODUZIONE

Risulta di fondamentale importanza, per la valutazione del rischio o per la ricostruzione della dinamica di un incendio, conoscere gli esiti generati sulle persone dall'esposizione all'evento incidentale in termini di tossicità ed irraggiamento (ustioni).

Tuttavia le ustioni, ancorché gravi ed estese, non giocano di norma un ruolo apprezzabile nel determinismo della morte, soprattutto quando essa sopraggiunge fin dalle prime fasi di combustione.

E' noto infatti che negli incendi si muore nella maggior parte dei casi a causa dei prodotti della combustione (gas tossici e fumi rilasciati ad alta temperatura) e che le altre cause concorrono in seconda battuta, quando il soggetto ha almeno perso conoscenza (incapacitazione).

Pertanto in occasione di un incendio che non abbia avuto inizio con un rilascio energetico impulsivo (esplosione) i danni per le persone riguardano prevalentemente conseguenze più o meno gravi, talvolta letali, a danno dell'apparato respiratorio.

Infatti la combustione (termo-ossidazione), ma anche soltanto la termo-degradazione (smoldering), danno luogo ad un rilascio di sostanze tossiche (asfissianti, irritanti, fumi intesi come particolati solidi combusti) ad elevata temperatura, che creano rapidamente una atmosfera incompatibile con la sopravvivenza di uomini e animali.

La presenza tra i prodotti della combustione di sostanze incompatibili con la vita si è aggravata, negli ultimi decenni, a causa del sempre più largo, se non addirittura esclusivo uso, negli arredi, negli indumenti, ma anche negli equipaggiamenti di vettori aerei, marittimi, ferroviari e stradali, di materiali di sintesi, i cosiddetti polimeri.

Talché al monossido di carbonio (CO), peraltro pericolosissimo e tossico, ed alla anidride carbonica (CO_2), altrettanto pericolosa ed asfissiante, presenti nella combustione di materiali organici (a base di carbonio), si aggiungono, in presenza di polimeri, altri ed ancora più potenti elementi tossici e irritanti.

Tra questi il più pericoloso di tutti è l'acido cianidrico (HCN) che si produce quando la sostanza in combustione contiene azoto (N). Non possono inoltre trascurarsi altri prodotti quali gli ossidi di azoto (NO_x), l'acido cloridrico (HCl) e tanti altri ancora, anche in considerazione che l'azione tossica, asfissiante e irritante dei gas in questione agisce con effetto cumulativo ed è funzione della dose assorbita.

6.2 EFFETTO DEI GAS SULL'ORGANISMO UMANO

I gas tossici prodotti da una combustione sono generalmente classificati in due categorie a seconda dell'effetto che essi hanno sulla vita umana. Queste due categorie sono quella dei **gas asfissianti** e dei **gas irritanti**. In realtà, esistono ulteriori categorie, cui poter fare riferimento come le diossine, ma questi tipi di prodotti hanno effetti di lungo termine e pertanto non rivestono valore critico in questa sede.

I gas asfissianti[9], a volte indicati come gas narcotici, causano nell'individuo confusione e perdita di conoscenza seguita da ipossia[10] quando ne è stata inalata una dose consistente. I più importanti sono il monossido di carbonio (CO) e l'acido cianidrico (HCN), ma anche l'anidride carbonica (CO_2) così come è importante l'effetto della carenza di O_2.

I gas irritanti, invece, hanno un effetto diretto poiché causano irritazioni agli occhi, al naso ed alle vie respiratorie superiori. Per questo tipo di interazioni, l'effetto non dipende dalla dose (concentrazione x tempo) ma solo dalla concentrazione, ed avviene immediatamente se la concentrazione ha superato il valore critico. Tuttavia, come per i gas asfissianti, esistono anche per i gas irritanti effetti di lungo termine che dipendono dalla dose e che possono causare problemi anche mortali, ma che non rivestono valore critico in questa sede.

Alla categoria dei gas irritanti appartengono i gas acidi inorganici, come il cloruro di Idrogeno (HCl), e gli irritanti organici come le aldeidi.

I valori critici delle concentrazioni dei gas citati non sono facili da determinare.

---

[9] Asfissia: impedimento più o meno grave della respirazione, per alterata composizione dell'aria o per accumulo di altri gas irrespirabili nel sangue.

[10] Ipossia: insufficiente disponibilità di ossigeno.

I dati reperibili in letteratura sono spesso derivati da test sugli animali, risultando solo parzialmente validi per l'uomo.

Tra i gas asfissianti, CO e HCN hanno un effetto indiretto sull'organismo poiché essi agiscono sul sistema di trasporto dell'ossigeno nel corpo. La tossicità del CO deriva dal suo combinarsi con l'emoglobina nel sangue per formare carbossiemoglobina. L'azione dell'acido cianidrico è differente da quella del CO poiché esso è nocivo già a basse concentrazioni agendo direttamente a livello cellulare. Gli effetti della CO_2 e della carenza di O_2 sono quelli dell'ipossia. Inoltre, la CO_2 incrementa il tasso di respirazione moltiplicando l'effetto delle altre sostanze. Gli effetti della CO_2 e di basse concentrazioni di O_2 sono in parte relativi alla dose ed in parte alla concentrazione.

Relativamente all'azione dei gas irritanti bisogna considerare due aspetti: in primo luogo, l'effetto irritante che può ritardare l'evacuazione e, secondariamente, i vari effetti fisici che possono portare alla morte.

6.2.1 Modelli di previsione dell'esposizione

Il tempo disponibile per la fuga da un ambiente nel quale siano penetrati o siano stati generati prodotti della combustione è quell'intervallo che termina quando le persone non possono più adottare azioni efficaci per portare a termine il proprio esodo. È il tempo minimo tra quelli valutati in relazione all'effetto dei gas asfissianti, dei gas irritanti, del calore e dell'oscuramento della vista dovuto al fumo.

Il principio di base della valutazione dei componenti asfissianti richiama il concetto di esposizione ad una dose. In termini analitici la dose alla quale è esposta una persona è l'integrale della curva tempo-concentrazione della specie tossica in esame.

Poiché, però, nell'incendio si presentano diverse specie tossiche contemporaneamente, è necessario individuare un algoritmo che consenta di tenere in conto l'effetto della contemporaneità di esposizione.

Tale scopo è stato raggiunto introducendo la grandezza adimensionale **FED** (Fractional Effective Dose - dose effettiva frazionaria) che, per un tempo definito di esposizione, restituisce il rapporto tra il valore della singola dose accumulata ed il rispettivo valore di soglia. La proprietà cumulativa della FED permette così il calcolo delle potenzialità nocive dei prodotti della combustione e la stima del possibile rischio per gli esseri viventi.

Possono considerarsi due differenti livelli di FED, a seconda dei valori di soglia utilizzati, corrispondenti ai due stadi successivi di incapacità psicomotoria e morte.

Nel caso dell'esodo è chiaro che il limite ultimo da considerarsi è quello dell'incapacità e non quello della morte. Un individuo incapacitato, continuando a stazionare passivamente presso luoghi nocivi arriverebbe alla morte dopo pochi minuti. Pertanto, nell'ambito di questo lavoro, si farà riferimento sempre a valori di soglia relativi all'incapacitazione. Così, il raggiungimento del valore unitario della FED, a causa dell'esposizione prolungata ad uno o più agenti nocivi, sarà contemporaneamente indicativo dell'incapacità a proseguire l'esodo e della morte.

In termini analitici si ha:

$$FED_i = \frac{\text{dose ricevuta al tempo t}}{\text{dose effettiva che causa incapacità o morte}} \tag{6.1}$$

$$FED = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{D_i}\int_{t_1}^{t_2} C_i(t)\,dt\right) \simeq \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{D_i}\sum_{t_1}^{t_2} C_i(\Delta t)\,\Delta t\right) \tag{6.2}$$

dove $\mathbf{C_i}$ [ppm] indica la concentrazione del gas i-esimo (istantanea o media) nell'incremento di tempo scelto, **dt** o **Δt** [minuti]**,** e $\mathbf{D_i}$ [ppm·minuto] è il valore di soglia, inabilitante o mortale, della dose del gas i-esimo.

In altre parole si valuta lo specifico componente di rischio in rapporto al valore dello stesso che causa un particolare effetto negativo per un dato tempo di esposizione (dose), o in certi casi per un dato istante di esposizione (concentrazione)[11].

Si può anche dire che le condizioni di non sostenibilità di un ambiente si realizzano quando il complesso delle dosi o delle concentrazioni delle singole esposizioni frazionali supera un determinato valore di soglia.

---

[11] Nel caso dei gas che svolgono un effetto irritante sulle vie aeree e sugli occhi delle persone, si applica un concetto leggermente diverso ma assolutamente analogo. In tal caso poiché l'effetto è governato dalla concentrazione alla quale gli individui sono esposti, si applica il concetto di concentrazioni frazionali (FEC) piuttosto che di dosi frazionali.

Nell'applicazione delle equazioni che seguono bisogna tenere in considerazione la diversa suscettibilità di ogni individuo alle varie sostanze (ad esempio, gente con problemi di asma, anziani o bambini). Bisogna cioè che la risposta delle persone all'esposizione sia valutata in termini di capacità media, ad esempio mediante una distribuzione di probabilità, in particolare introducendo dei coefficienti di sicurezza che forniscano valori di soglia con elevata probabilità di superamento, per porre maggiore attenzione sulla risposta della parte più sensibile della popolazione.

6.2.2 La Fractional Effective Dose

In letteratura esistono diversi tipi di modelli basati sul concetto di FED, con valori di soglia differenti, in certi casi riferiti all'incapacitazione ed in altri riferiti alla morte.

Si riporta di seguito la formulazione del Purser [66] per la valutazione della FED che porta all'incapacitazione e che si fonda sulle seguenti ipotesi principali:

- l'effetto narcotico della CO_2 è considerato indipendente dall'effetto degli altri gas;
- gli effetti delle varie altre specie gassose, siano esse asfissianti o irritanti, possono considerarsi additivi;
- l'effetto della CO_2 è tenuto in conto come fattore moltiplicativo degli effetti delle altre sostanze per via dell'incremento della frequenza respiratoria che esso induce (iperventilazione).

La formulazione del Purser fornisce le seguenti equazioni:

$$FED_{INC} = \max\left(\left[\left(FED_{CO} + FED_{HCN} + FEC_{irr}\right)\cdot V_{CO_2} + FED_{O_2}\right],\ FED_{CO_2}\right) \tag{6.3}$$

$$FED_{CO} = \frac{8{,}2925\cdot 10^{-4}\cdot \text{ppm}[CO]^{1{,}036}}{30} \tag{6.4}$$

$$FED_{HCN} = \frac{1}{\exp\left(5{,}396 - 0{,}023\cdot \text{ppm}[HCN]\right)} \tag{6.5}$$

$$FEC_{irr} = \sum_{i=1}^{n} \frac{C_i}{F_i} \tag{6.6}$$

$$V_{CO_2} = \frac{\exp\left(0{,}193 \cdot \%[CO_2] + 2{,}0004\right)}{7{,}1} \tag{6.7}$$

$$FED_{O_2} = \frac{1}{\exp\left[8{,}13 - 0{,}54 \cdot \left(20{,}9 - \%[O_2]\right)\right]} \tag{6.8}$$

$$FED_{CO_2} = \frac{1}{\exp\left(6{,}1623 - 0{,}5189 \cdot \%[CO_2]\right)} \tag{6.9}$$

La concentrazione delle specie considerate [$\mathbf{C_i}$] deve intendersi in ppm o in % a seconda della scrittura che precede la parentesi quadra. E' bene notare che alle equazioni precedenti non è applicato alcun coefficiente di sicurezza.

Tempo (min)	0-13	13-27	27-40	40-53	53-67
FED_{CO}	0,006	0,010	0,012	0,024	0,024
FED_{HCN}	0	0	0	0	0
V_{CO2}	1,019	1,032	1,037	1,069	1,069
FED_{O2}	0	0	0	0	0
ΣFED	0,078	0,218	0,387	0,725	1,089

Tabella 6.1 - Valori di dose effettiva frazionaria (FED) registrati in laboratorio a seguito di combustione covante di una poltrona in schiuma poliuretanica (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering).

Deve essere ulteriormente notato che le equazioni per il calcolo delle singole componenti della FED, sono relative ad un minuto di esposizione (60 secondi). Per esposizioni a concentrazioni costanti, il valore della FED può essere determinato moltiplicando i valori delle equazioni per il tempo di esposizione **t** espresso in minuti.

Per esposizioni dove la concentrazione varia nel tempo, il valore totale della FED può essere calcolato discretizzando l'esposizione, determinando cioè la media di esposizione

per ogni minuto e sommando i singoli contributi, secondo l'equazione (6.2).

6.2.3 La Fractional Effective Concentration

Nelle formule precedenti è stato introdotto il termine FEC_{irr} per valutare l'effetto della presenza di gas irritanti in fase di vapore sul tempo a disposizione per l'esodo. Il suo calcolo si effettua attraverso un algoritmo sostanzialmente uguale a quello illustrato per i gas asfissianti.

Poiché però l'effetto irritante avviene al primo contatto dei gas con la parte alta degli organi di respirazione, si deve fare riferimento alla concentrazione e non alla dose.

Anche nel caso dell'effetto delle sostanze irritanti si postula la sommabilità degli effetti delle singole specie considerate. Inoltre, come nel caso precedente, si individua nel momento in cui la somma supera una determinata soglia il tempo limite oltre il quale non è più considerata sopportabile la situazione dell'ambiente.

F	ppm
HCl	1000
HBr	1000
HF	500
SO_2	150
NO_2	250
acroleina - CH_2CHCHO	30
formaldeide - CH_2O	250

Tabella 6.2 - Concentrazioni limite di specie irritanti (SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Section 2 Chapter 15 Smoke Production and Properties, G.W. Mulholland).

Il valore della FEC, come definito nel documento ISO/TS 13571:2002 [69] (di riferimento per il DM 28/10/2005), è pari a:

$$FEC_{irr} = \frac{[HCl]}{F_{HCl}} + \frac{[HBr]}{F_{HBr}} + \frac{[HF]}{F_{HF}} + \frac{[NO_2]}{F_{NO_2}} + \frac{[SO_2]}{F_{SO_2}} + \sum \frac{[irritante]}{F_{C_i}} \qquad (6.10)$$

a questo valore può aggiungersi quello ricavato dal monitoraggio di sostanze tossiche

addizionali quali l'acroleina e la formaldeide:

$$FEC_{irr\ addizionale} = \frac{[acroleina]}{F_{acroleina}} + \frac{[formaldeide]}{F_{formaldeide}} \tag{6.11}$$

in entrambe le formule le concentrazioni dei gas irritanti sono espresse in ppm ed F_i indica la concentrazione limite del gas irritante, oltre la quale si considera compromessa la capacità della persona di adottare azioni adeguate per mettersi in salvo.

6.3 LA VISIBILITÀ NELLE VIE DI ESODO

I fumi derivanti da una combustione contengono particolato, che è il responsabile dell'oscuramento visivo che può impedire la capacità delle vittime di un incendio di allontanarsi dal fuoco. L'effetto buio del particolato dipende dalla concentrazione e non dal tempo di esposizione.

I modelli utilizzati per valutare la sicurezza durante l'esodo in relazione all'abbattimento della visibilità dovuto alla presenza di fumo sono basati sul principio di controllare il contrasto minimo tra le superfici rilevabili dall'occhio umano, e cioè la differenza minima che l'occhio riesce a percepire tra un oggetto e lo sfondo.

La quantità più usata per la stima della visibilità è il coefficiente di estinzione **K** [62]. L'intensità di una luce monocromatica passante attraverso il fumo a distanza **L** [m] si attenua in funzione di **K** secondo l'equazione:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-kL} \tag{6.12}$$

$$K = K_m \cdot \rho \cdot Y_s \tag{6.13}$$

dove **ρ** [Kg/m^3] è la densità del fumo, $\mathbf{Y_s}$ [kg/kg] è la frazione di combustibile che viene convertita in particolato solido e $\mathbf{K_m}$ [m^3/Kg] è un coefficiente di estinzione di massa specifico che dipende dal combustibile.

Stime della visibilità possono essere effettuate usando l'equazione:

$$S = \frac{C}{K} \tag{6.14}$$

dove **C** è una costante adimensionale caratteristica del tipo di oggetto che si osserva attraverso il fumo. In particolare C = 8 per un segnale di luce emittente e C = 3 per un segnale di luce riflettente. Poiché K varia da punto a punto nel dominio, la visibilità S varierà altrettanto.

Valori limite di oscuramento visuale basati sul valore di **K** sono stati proposti da diversi autori. Jin [67] ha individuato nei valori K = 0,15 m^{-1} e K = 0,50 m^{-1} i limiti oltre i quali l'esodo è impossibilitato rispettivamente, per soggetti che non hanno un approccio familiare con la via fuga e per soggetti che invece hanno una certa conoscenza dei percorsi di evacuazione. Questi numeri corrispondono, approssimativamente, a valori di visibilità limite di 20 m e 6 m, rispettivamente (calcolati con riferimento alla luce di segnali intermittenti).

Babrauskas [68] invece ha proposto un limite di accettabilità corrispondente ad un valore K = 1,20 m^{-1}, che fornisce un limite di visibilità pari a 2,50 m.

Un modello basato sul concetto di contrasto minimo può, inoltre, essere trovato nel documento ISO/TS 13571:2002 [69].

6.3.1 L'impatto del fumo sul movimento

La presenza di fumo nelle vie di esodo diminuisce la probabilità delle persone di muoversi nell'area interessata dal fumo e diminuisce la velocità di esodo.

Osservazioni condotte su persone che hanno dovuto muoversi attraverso fumi con caratteristiche irritanti o tossiche hanno consentito di evidenziare il legame tra il coefficiente di estinzione e la velocità di esodo.

I dati ottenuti hanno messo in evidenza che in presenza di fumi molto irritanti non solo la velocità di movimento diminuisce drasticamente per valori del coefficiente di estinzione K superiori a 4/10, ma che il percorso massimo osservato in tale situazione non supera i 10 m. La velocità di esodo, in tale situazione, è valutabile tra 0,2 m/s e 0,4 m/s (Figura 6.1).

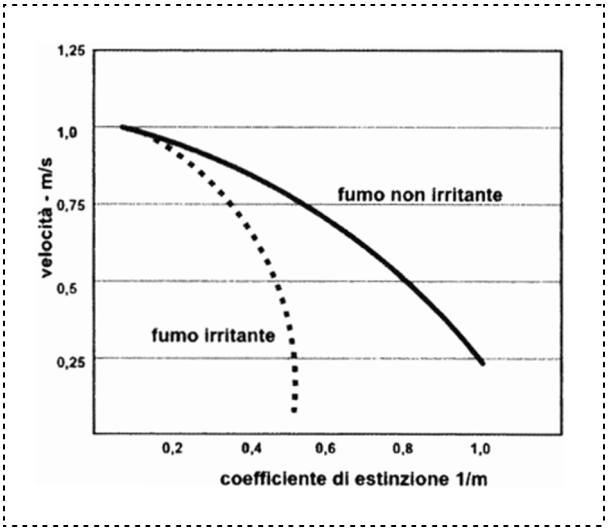

Figura 6.1 - Rapporto tra velocità di esodo e densità del fumo.

6.4 EFFETTI DEL CALORE SUL CORPO UMANO

Secondo il documento ISO/TS 13571:2002 [69], gli effetti letali dell'esposizione al calore per il corpo umano, possono essere considerati con riferimento a tre aspetti:

- ipertermia;
- ustioni cutanee;
- ustioni del tratto respiratorio.

Per valutare l'effetto del calore sul corpo umano ai fini della sicurezza e della determinazione delle condizioni di sostenibilità in un ambiente interessato dall'incendio, è sufficiente valutare i primi due, in riferimento alla soglie oltre le quali, rispettivamente, le ustioni provocano dolore e l'ipertermia provoca deterioramenti mentali pericolosi per il proseguo dell'evacuazione.

Le fonti di calore più importanti all'interno di uno scenario d'incendio sono fornite dal flusso di calore radiante delle fiamme (e/o delle superfici irradiate che a loro volta riflettono ed emettono parte di questa energia) e dal flusso di calore convettivo proveniente dai gas combusti.

E' stato mostrato che gli effetti del flusso radiante hanno importanza rilevante solo per

flussi superiori a 2,5 kW/m^2. Valori al di sotto di questo limite di esposizione possono essere tollerati per 30 minuti senza che si abbiano effetti significativi sul tempo di evacuazione. Al di sopra di questo valore di soglia, il tempo a cui può essere soggetto un individuo senza subire significative ustioni della pelle (ustioni di secondo grado), decresce rapidamente e può essere calcolato secondo l'equazione:

$$t_{1\,rad} = 4 \cdot q^{-1,35} \tag{6.15}$$

dove il tempo $\mathbf{t_{1\,rad}}$ è espresso in minuti ed il flusso termico radiativo **q** è espresso in kW/m^2.

Per il flusso convettivo può invece considerarsi un valore limite, per la tolleranza termica della pelle nuda, attorno ai 120°C. Il documento ISO/TS 13571:2002 [69] fornisce due equazioni per il calcolo del tempo limite di esposizione a flussi di calore convettivo, considerando i due casi di completa e parziale (o leggera) vestizione.

Persona completamente vestita: $t_{1\,conv} = \left(4 \cdot 10^8\right) \cdot T^{-3,61}$ (6.16)

Persona parzialmente o leggermente vestita: $t_{2\,conv} = \left(5 \cdot 10^7\right) \cdot T^{-3,40}$ (6.17)

dove i tempi $\mathbf{t_{1\,conv}}$ e $\mathbf{t_{2\,conv}}$ sono espressi in minuti e la temperatura **T** in °C.

Si può a questo punto sviluppare una metodologia basata sul concetto di esposizione ad una dose anche per gli effetti complessivi del calore. Bisogna però fare l'ipotesi che durante il tempo di esposizione la temperatura sia stazionaria o crescente. Si può dunque calcolare la frazione totale inabilitante secondo l'equazione:

$$FED_{calore} = \sum_{t_1}^{t_2} \left(1/t_{rad} + 1/t_{conv}\right) \cdot \Delta t \tag{6.18}$$

dove i valori di tempo, come nelle equazioni precedenti sono espressi in minuti. Bisogna notare nell'applicazione di quest'equazione che quando il termine radiativo si riferisce ad un flusso minore di 2,50 kW/m^2, esso deve porsi uguale a zero.

Un'altra espressione è stata fornita da Purser, per l'esposizione ad elevate temperature ed alti tassi di umidità, basata su dati correlati all'ipertermia (esposizione di lungo tempo a

basse temperature) e su dati correlati alle ustioni (esposizione di breve tempo ad alte temperature):

$$FED_{calore} = \frac{1}{\exp\left(5{,}1849 - 0{,}0273 \cdot T\right)} \tag{6.19}$$

dove **T** [°C] e la temperatura dei gas.

Sembra lecito poter ritenere, ai fini dell'incapacitazione, che gli effetti dell'esposizione ai gas tossici ed al calore possano ritenersi indipendenti, cioè non cumulativi. In altri termini:

$$FED = \max\left(FED_{gas}\ ,\ FED_{calore}\right) \tag{6.20}$$

6.5 APPROFONDIMENTI SULLA MORTE PER ASFISSIA

In occasione di un incendio, la causa di morte più temibile è la sindrome asfittica. Essa è caratterizzata da uno stato di ipossia o anossia acuta, cioè da una carenza o mancanza di ossigeno, che mettono a rischio in tempi brevi o brevissimi la vita dell'uomo.

Si intende "catena respiratoria" il processo sequenza delle tre fasi di:

1. assunzione dell'ossigeno dall'ambiente attraverso le vie respiratorie;
2. trasporto dell'ossigeno alle cellule mediante l'emoglobina del sangue (HbO_2 ossiemoglobina);
3. utilizzazione dell'ossigeno a livello cellulare.

Quando la catena respiratoria, si interrompe in uno dei suoi tre anelli fondamentali, la morte sopraggiunge rapidamente.

Dalla letteratura medico-legale si ricava che, sul piano fisiopatologico, collegate ai tre anelli della catena suddetta, sono possibili tre varianti di sindrome asfittica rispettivamente denominate anossia anossica, anossia di trasporto ed anossia istotossica.

L'anossia anossica dipende da mancanza di ossigeno nell'aria inspirata, ma anche da arresto respiratorio per paralisi dei centri bulbari o da lesioni acute e gravi dell'apparato respiratorio che compromettono la ventilazione polmonare. La carenza o l'assenza di

ossigeno può essere dovuta alla presenza di gas che si sostituiscono all'ossigeno dell'aria, come ad esempio l'anidride carbonica (CO_2) che si produce in occasione di un incendio. Le sostanze che diventano dannose solo per il fatto di sostituirsi all'ossigeno dell'aria sono dette asfissianti.

L'anossia di trasporto ha come causa principale l'intossicazione acuta da ossido di carbonio (CO) che, legandosi in via privilegiata all'emoglobina (Hb) del sangue, forma la carbossiemoglobina (HbCO) e si sostituisce completamente al veicolo di trasporto dell'ossigeno costituito dall'ossiemoglobina (HbO_2), lasciando in tal modo le cellule prive dell'indispensabile ossigeno.

L'anossia istotossica, infine, consegue in genere ad intossicazioni acute da acido cianidrico (HCN) e da composti cianogeni. Essa si rileva mediante la presenza di cianuri nel sangue.

Nelle sindromi asfittiche di soggetti coinvolti in un incendio sono di norma presenti tutti e tre i meccanismi anossici sopra riportati, a causa della presenza in ambiente dei prodotti della combustione ad alta temperatura, quali appunto ossido di carbonio, acido cianidrico, fumo (particolati solidi combusti).

Quando ciò non avviene, si può ritenere che la morte sia sopraggiunta fin dai primissimi momenti dell'incendio, quando cioè le concentrazioni di tali sostanze tossiche non erano ancora apprezzabili.

Talché la morte, se non ascrivibile ad altre cause (ad es. infarto, collasso cardiocircolatorio, etc.) ma confermata per sindrome asfittica, può essere ricondotta alla sola anossia anossica, in altre parole al soffocamento in conseguenza di gravi lesioni a carico delle prime vie dell'apparato respiratorio prodotte da aria ad elevata temperatura che hanno impedito al soggetto di respirare.

Ciò avviene quando il capo del soggetto (cioè naso e bocca, le sole sezioni di ingresso dell'aria necessaria alla respirazione) è costretto a stazionare in prossimità del primitivo focolaio d'incendio, potendo in tal modo introdurre soltanto aria ad altissima temperatura, circa 600-700 °C.

Per la ricostruzione della dinamica di un incendio all'analista tecnico può risultare utile conoscere gli esiti degli accertamenti tossicologici di natura medico legale che pertanto dovrebbero essere sempre eseguiti. La conoscenza del tasso di carbossiemoglobina (%HbCO) e dei cianuri (HCN) nel sangue di eventuali vittime, ad esempio, consente spesso

utili riferimenti per la ricostruzione della sequenza incidentale. Infatti il tempo richiesto ad un soggetto per raggiungere una data concentrazione di entrambe le sostanze tossiche, che peraltro seguono diversi meccanismi, anche attraverso riscontri incrociati, può fornire indicazioni estremamente utili sui fenomeni connessi alla prima fase, quella di ignizione, di un incendio.

La produzione di CO nella combustione con fiamma è in larga misura dipendente dalla disponibilità di ossigeno. Essa è correlata al rapporto di equivalenza combustibile/aria nelle condizioni reali dell'incendio rispetto a quello in condizioni stechiometriche, cioè nelle condizioni per le quali il rapporto fra il combustibile e l'aria è esattamente quello richiesto per la combustione completa.

In grave difetto di ossigeno, il rateo di rilascio di CO può raggiungere valori di 0,1÷0,2 kg di CO per kg di sostanza combusta. La tossicità del CO deriva dalla sua capacità di legarsi all'emoglobina per formare carbossiemoglobina (HbCO) con una affinità fino a 270 volte maggiore di quella dell'ossigeno e quindi di interferire con il trasporto dell'ossigeno (O_2) da parte del sangue.

La corrispondente mancanza di ossigeno (anossia) viene appunto definita anossia da trasporto. Il livello di carbossiemoglobina nel sangue di fumatori "forti" può variare fra il 5 ed il 12%. Sono disponibili diversi algoritmi di altrettanti ricercatori che consentono di risalire dal tasso di carbossiemoglobina %[HbCO] al tempo durante il quale la vittima ha respirato in presenza di CO. Di seguito ne ricordiamo alcuni.

Stewart-Peterson:

$$\%[\mathrm{HbCO}] = \left(3{,}317 \cdot 10^{5}\right) \cdot \left(\mathrm{ppm[CO]}\right)^{1{,}036} \cdot V_p \cdot t \tag{6.21}$$

dove **ppm[CO]** è la concentrazione di monossido di carbonio espressa in ppm, $\mathbf{V_p}$ [litri/min] è la ventilazione polmonare (Tabella 6.3), e **t** [min] è il tempo di respirazione in presenza di CO alla concentrazione considerata.

Pace:

$$\%[\mathrm{HbCO}] = \frac{\mathrm{ppd[CO]} \cdot V_p \cdot t}{46{,}5 \cdot V_b} \tag{6.22}$$

dove **ppd[CO]** è la concentrazione di monossido di carbonio espressa in parti per diecimila, $\mathbf{V_b}$ [l] è la massa sanguigna (dipende dal peso, orientativamente 5 ÷ 6 litri), $\mathbf{V_p}$ [litri/min] è la ventilazione polmonare (Tabella 6.3), e **t** [min] è il tempo di respirazione in presenza di CO alla concentrazione considerata.

Forbes:

$$\%[HbCO] = k \cdot \%[CO] \cdot t \tag{6.23}$$

dove **%[CO]** è la concentrazione monossido di carbonio espressa in percento, **k** è un coefficiente di ventilazione (Tabella 6.3), e **t** [min] è il tempo di respirazione in presenza di CO alla concentrazione considerata.

	riposo	attività leggera	50 watt	100 watt
Vp	6 l/min	9 l/min	18 l/min	30 l/min
k	3	5	8	11

Tabella 6.3 - Valori di ventilazione polmonare e del coefficiente k in funzione dell'attività svolta o della potenza consumata, per le formulazioni di Stewart-Peterson (6.21) e di Forbes (6.23).

Gli effetti tossici del monossido di carbonio (CO) seguono la regola di Haber che, in sostanza, afferma che tali effetti sono proporzionali alla dose (concentrazione x tempo) accumulata e non solo alla concentrazione della sostanza tossica considerata. Tale regola indica che l'effetto prodotto da una concentrazione C_1 per un tempo t_1 equivale a quello prodotto da una concentrazione C_2 per un tempo t_2. Talché si ha:

$$C_1 \cdot t_1 = C_2 \cdot t_2 \quad \Rightarrow \quad \frac{C_1}{C_2} = \frac{t_2}{t_1} \tag{6.24}$$

La produzione di acido cianidrico (HCN) dipende dalla natura della sostanza combusta e dalla temperatura di combustione, ma non è correlata alla disponibilità di ossigeno. In particolare producono HCN le sostanze combustibili che contengono azoto (N) quando bruciano ad elevate temperature.

L'acido cianidrico (HCN) è circa 25 volte più tossico del monossido di carbonio (CO) ed ha un'azione molto rapida. In caso di inalazione di alte concentrazioni si può avere perdita di

coscienza (incapacitazione) dopo pochi atti respiratori. L'azione dell'acido cianidrico è dovuta allo ione cianuro, (CN-) che si forma nel sangue per idrolisi dell'HCN dando luogo alla cianometaemoglobina, ma che si distribuisce in tutta l'acqua corporea e raggiunge le cellule di tutti gli organi dove impedisce l'utilizzo dell'ossigeno (anossia citotossica), provocando un blocco della produzione energetica e quindi la morte cellulare.

Nell'intossicazione da cianuro si ha un iniziale aumento della frequenza respiratoria con fame d'aria (presumibilmente legata ad una stimolazione dei chemorecettori sensibili alla richiesta di ossigeno) che causa l'aumento dell'inalazione dei tossici presenti in atmosfera, provocando un effetto che si auto esalta. In ogni caso, la morte del soggetto avviene di norma per arresto respiratorio di origine centrale.

L'acido cianidrico non segue la regola di Haber e, a parità di dose accumulata, l'effetto tossico dipende fortemente dalla concentrazione del gas inalato. Brevi esposizioni ad alte concentrazioni di HCN sono maggiormente suscettibili di gravi danni rispetto ad esposizioni a minori concentrazioni per un tempo più lungo. In particolare, è stato rilevato che, per una concentrazione di HCN pari a 100 ppm, l'incapacitazione interviene in circa 20 minuti (dose eguale a 2000 ppm x min.) mentre, per una concentrazione di 200 ppm, l'incapacitazione interviene solo dopo 2 minuti (dose eguale a 400 ppm x min).

Di norma gli algoritmi sopra riportati si utilizzano prevalentemente per calcolare il tempo durante il quale il soggetto ha continuato a respirare a partire dall'inizio della combustione, ma la concentrazione degli inquinanti non è in genere nota, pertanto è necessario procedere per ipotesi credibili.

Si deve avvertire che, nella realtà di un incendio, le concentrazioni delle sostanze tossiche non sono costanti, poiché partendo da valori iniziali pari a zero esse assumono valori crescenti che dipendono dal modo in cui si sviluppa l'incendio.

Per una stima quantitativa delle concentrazioni medie degli inquinanti determinatesi nel corso dell'incendio, è necessario definire, in via preliminare, diversi parametri, alcuni dei quali possono essere valutati solo per via indiretta e talvolta con grande approssimazione.

CAPITOLO 7

IL COMPORTAMENTO UMANO NELL'INCENDIO

7.1 INTRODUZIONE

Lo scopo principale della valutazione prestazionale è quello di verificare se un ambiente nel quale si verifica un incendio è in grado di mantenere al suo interno o in determinate parti e per un certo tempo le condizioni che consentono la sopravvivenza delle persone.

La valutazione, a sua volta, è rivolta essenzialmente a due aspetti di sicurezza: l'effetto dei fumi e dei gas tossici sulla capacità delle persone di sopravvivere nell'ambiente e la diminuzione di visibilità come elemento di pericolo per chi affronta l'esodo in presenza di fumo.

Il primo di questi aspetti è stato trattato dal documento ISO/TS 13571:2002 "*Life threat from fires - guidance on the estimation of time available for escape using fire data*" [69].

Una terza linea di valutazione può anche essere quella della tutela dei beni che nel caso del patrimonio storico e culturale o nel caso della protezione dei dati assume un significato altrettanto importante.

Lo studio del comportamento umano in caso di incendio presenta delle difficoltà non facilmente superabili poiché molte delle situazioni di cui sarebbe importante conoscere i dati non possono essere simulate in laboratorio. Inoltre può essere considerata solo parziale l'attendibilità delle informazioni ottenute a seguito di esercitazioni nelle quali manca l'effetto sorpresa o l'ansia, lo stress e la possibilità di panico che possono manifestarsi nelle situazioni reali. Poi, la complessità del comportamento umano rende difficile la previsione dei dati che sarebbero utili ai fini della sicurezza antincendio.

L'evacuazione di un ambiente interessato da un incendio è un processo complesso, che ha inizio, quando le persone divengono consce dell'esistenza di una situazione di emergenza legata all'incendio e mettono in atto una serie di processi mentali e di azioni, prima e durante l'adozione di comportamenti che li portano verso luoghi sicuri.

Gli indizi iniziali possono essere quelli legati alla percezione diretta dell'incendio e dei suoi prodotti, oppure possono essere indizi indiretti risultanti, ad esempio, dall'attivazione di

segnali di allarme o dalla comunicazione con altre persone. Una volta ricevuti questi indizi, l'evacuante inizierà un processo di validazione degli stessi che proseguirà anche durante la fuga. Prima dell'inizio dell'esodo la persona dovrà prendere delle decisioni su cosa fare, se raccogliere degli oggetti o meno, se chiamare altre persone aiutandole eventualmente a portarsi in salvo.

Una volta che la persona si è portata in un luogo sicuro, e cioè in un luogo nel quale è certamente al riparo da qualunque effetto dell'incendio, sarà trascorso un certo intervallo di tempo che nella letteratura tecnica internazionale è definito come **RSET** (**Required Safety Egress Time**). Questo tempo dovrà essere necessariamente inferiore a quello massimo consentito dall'incendio per garantire le condizioni di sopravvivenza. Questo secondo tempo è conosciuto come **ASET** (**Available Safety Egress Time**). Il rapporto tra questi due tempi costituisce il fattore di sicurezza che il percorso di esodo, e quindi la struttura studiata, garantisce in caso di incendio.

Per la valutazione del tempo RSET è necessario conoscere fondamentalmente le caratteristiche di reazione delle persone all'incendio, mentre per la definizione del tempo massimo disponibile, ASET, dovranno essere valutate le caratteristiche ambientali e dei materiali in relazione alla produzione di fumo, specie irritanti e tossiche ed alla quantità di calore rilasciato nell'ambiente.

7.2 L'INTERAZIONE UOMO-PERCORSO-AMBIENTE

La valutazione del tempo richiesto per l'esodo sfugge all'inquadramento fondato sui numeri e sulle relazioni che è stato individuato per la dinamica dell'incendio. Infatti, per lo studio di questo argomento sono fondamentali le considerazioni sulle persone e sull'ambiente all'interno del quale si trovano.

E' opportuno ricordare, infatti, che la medesima situazione, può assumere caratteri completamente differenti a seconda, ad esempio, che la folla sia costituita da giovani o da anziani. Poi, altri fattori comportamentali (ad esempio, persone che hanno già avuto esperienza di emergenze) ed i diversi livelli di percezione del pericolo, contribuiscono a determinare un'ampia diversità di azioni.

Tra i fattori che influenzano più profondamente il comportamento in caso di incendio si deve ricordare l'informazione. Tanto più saranno chiare le informazioni tanto più la persona

che ne è in possesso avrà un comportamento coerente con le esigenze di sicurezza.

La percezione è basata sia su fattori fisici che sociali.

La parte inerente ai fattori fisici riguarda proprio l'informazione che giunge all'individuo da tutto ciò che lo circonda nell'ambiente fisico all'interno del quale si trova. La parte sociale riguarda, invece, l'interazione con gli altri soggetti e quindi le informazioni che possono essere assunte dalle altre persone. L'efficacia dell'informazione, in entrambi i casi, è determinata da attributi specifici (nel caso dei messaggi vocali, ad esempio, contano aspetti quali il tono della voce, le parole utilizzate, la loro intelligibilità).

Il comportamento di un individuo dipende anche dall'interazione delle sue capacità fisiche e cognitive con l'ambiente. In particolare, possono individuarsi tre categorie di interazione ognuna delle quali può essere responsabile del comportamento:

- **interazione tra capacità fisiche e ambiente**: il caso più evidente di questo tipo di interazione è quello di una persona con capacità motorie limitate o impedite che deve affrontare una via di esodo verticale (scale). Anche le limitazioni sensoriali sono importanti esempi di questo aspetto. Nel caso generale si deve ricordare, invece, che la risposta delle persone agli agenti irritanti o tossici può variare profondamente, costituendo un ulteriore problema;
- **interazione tra capacità cognitive e ambiente**: in questo caso uno degli elementi che può modificare la risposta in caso di incendio riguarda il modo nel quale le persone prendono decisioni, percepiscono i rischi e conoscono il proprio comportamento nell'emergenza. Anche il ruolo sociale può portare a compiere azioni non prevedibili, influenzate dall'ambiente nel quale si svolgono;
- **interazione fisico-cognitiva contemporanea:** in questo caso si ha contemporaneità di entrambe le interazioni fisica e cognitiva, come nel caso di una persona che vede limitate le proprie capacità a causa dell'incendio e per questo non riesce a rispondere correttamente ai segnali provenienti dall'ambiente.

I resoconti di eventi catastrofici di grande dimensione confermano l'importanza della valutazione di questi aspetti del comportamento umano.

Durante l'attacco alle Torri Gemelle (New York, USA) del 2001, persone perfettamente a conoscenza del piano di esodo non riuscirono a fuggire a causa dello stress e della paura; questo è un chiaro esempio di come l'interazione tra capacità cognitive e circostanza può condizionare il comportamento.

Nell'incendio dell'aeroporto di Dusseldorf (Germania, 1995), alcuni visitatori dell'aerostazione rimasero intrappolati nel piano interrato dopo aver scelto di prendere l'ascensore, per l'assenza di indicazioni di pericolo specifiche; questo esempio dimostra invece l'importanza dell'informazione.

7.3 LE CARATTERISTICHE DEGLI OCCUPANTI

Le caratteristiche delle persone presenti nell'ambiente oggetto di studio, che per conformità con i testi normativi e tecnici reperibili indichiamo con la parola **occupanti,** costituiscono un aspetto fondamentale nella previsione della risposta in caso di incendio.

<table>
<tr><td rowspan="2">Inizio o sviluppo dell'incendio o dell'indizio</td><td colspan="4">Processo di validazione degli indizi</td></tr>
<tr><td>Ricezione degli indizi</td><td>Riconoscimento degli indizi</td><td>Interpretazione degli indizi</td><td>Ricezione, riconoscimento, interpretazione</td></tr>
<tr><td rowspan="3"></td><td rowspan="2"></td><td colspan="3">Periodo di decisione</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Periodo di pre-movimento</td><td>Decisione durante il movimento</td></tr>
<tr><td></td><td>Movimento fino a luogo sicuro</td></tr>
</table>

Figura 7.1 - Processo di esodo e processi di decisione e di movimento.

Nella valutazione delle caratteristiche degli occupanti bisogna analizzare le caratteristiche chiave di gruppi specifici. Per esempio, la conoscenza dei luoghi, la familiarità con le procedure di emergenza, la capacità e la velocità di reazione possono essere elementi determinanti a questo scopo.

Questo tipo di valutazione è basato sulla conoscenza del processo di ricezione, di interpretazione e di validazione degli indizi (**Figura 7.1**).

Gli indizi che possono essere presi in considerazione da una persona coinvolta in qualche modo da un incendio all'interno di una struttura sono quelli forniti dai sistemi di rilevazione e di allarme, dalla percezione diretta dei prodotti della combustione, dalla comunicazione da parte di altre persone, fino ad arrivare all'interruzione dei servizi (energia

elettrica, comunicazione etc.). Tutti questi segnali non danno inizio necessariamente all'esodo, ma devono essere valutati in relazione alle caratteristiche dei gruppi di persone identificati ai fini della risposta per l'esodo.

Per quanto riguarda il processo di decisione, la valutazione deve prendere in considerazione quali azioni le persone possono adottare dopo avere ricevuto ed interpretato gli indizi provenienti dall'ambiente circostante. Tali azioni possono ricadere tra le seguenti:

- cercare ulteriori informazioni;
- cercare altre persone;
- cercare di avvisare altre persone;
- tentare l'estinzione dell'incendio;
- iniziare l'esodo;
- proseguire la propria attività.

La documentazione di eventi avvenuti nel passato dimostra che queste azioni possono ritardare l'inizio del movimento verso un luogo sicuro e l'esame di questi dati deve essere particolarmente attento, poiché i tempi di esodo registrati nella realtà devono essere valutati alla luce delle specifiche caratteristiche delle persone presenti.

Un ulteriore elemento da valutare è quello relativo alle persone che si trovano solitarie in un ambiente. La presenza di altre persone, di solito, ha un effetto di inibizione sull'avvio dell'esodo quando gli indizi sono incerti, anche se aumenta le possibilità di essere avvertito da un allarme. Al contrario, una persona sola risponderà più velocemente ad indizi incerti.

La familiarità con i percorsi gioca un ruolo importante nella strategia di sicurezza.

Chi è bene informato di solito conosce tutte le vie di esodo e può velocemente localizzare quella più vicina. Al contrario, chi non possiede una adeguata informazione tenderà in genere ad utilizzare i percorsi di sicurezza soltanto dopo aver verificato l'impraticabilità di altri percorsi istintivamente più familiari.

Il tempo di pre-movimento sarà influenzato dal tipo di attività che le persone stanno svolgendo. Lavorare, guardare un film o dormire comportano necessariamente dei tempi di reazione molto differenti.

I fattori da considerare nell'analisi delle caratteristiche di comportamento di ogni individuo riguardano aspetti come il genere, l'età, le capacità fisiche e sensoriali,

l'informazione e l'esperienza posseduta, il ruolo sociale e l'impegno verso la propria attività.

L'importanza delle caratteristiche è relativa alla particolare valutazione che deve essere svolta. Tali aspetti possono quindi essere riferiti al solo gruppo che risulta essere più critico ai fini della valutazione.

Nella Tabella 7.1 sono indicate alcune tra le principali caratteristiche degli occupanti che hanno rilevanza ai fini della velocità di esodo.

CARATTERISTICHE DELLE PERSONE	DESCRIZIONE
Numero delle persone e densità	Il numero massimo ammesso in ogni ambiente è spesso indicato dalle norme o dalle caratteristiche dell'ambiente stesso. Può essere opportuno, in certi casi, prevedere numeri e densità superiori a tali valori.
Da soli o con altri	L'essere con altri inibisce l'avvio di azioni particolari quando gli indizi sono incerti, ma garantisce una migliore comunicazione.
Affiliazione sociale	Insieme al punto precedente, questo aspetto può essere rilevante nella determinazione del tempo di pre-movimento, dato che alcuni gruppi potrebbero tentare di ricomporsi prima di iniziare il movimento.
Familiarità con i percorsi	La conoscenza delle vie di esodo e dei sistemi di allarme garantisce procedure di esodo più rapide.
Distribuzione ed attività svolte, stato di sveglia	L'attività svolta influenza notevolmente il tempo di pre-movimento. La distribuzione spaziale degli individui interferisce con la velocità di movimento, che è legata alla densità dei gruppi che si muovono nelle vie di esodo.
Ruolo e responsabilità	Il ruolo sociale può essere rilevante nell'emergenza, soprattutto se associato ad autorità ed addestramento.
Ubicazione	Oltre ad essere rilevante per il tempo di movimento, l'ubicazione può influenzare la comprensione dell'allarme ed anche la sua ricezione.
Impegno	Le persone si trovano in un determinato ambiente per un motivo. L'esistenza delle ragioni per cui sono presenti può proseguire anche dopo la ricezione dei primi indizi sull'esistenza di condizioni anomale. Questo può rendere le persone riluttanti a rispondere alle esigenze dell'emergenza.
Punto focale	Molte strutture hanno un luogo verso il quale le persone guardano o convergono, come ad esempio il palco di un teatro. Questo tipo di attenzione si manterrà anche in caso di allarme e potrà essere utilizzata durante l'emergenza per fornire le indicazioni sull'esodo o sul comportamento da osservare.
Condizioni delle persone	Durante l'esodo le condizioni delle persone possono cambiare anche in relazione alla concentrazione o alla dose accumulata di specie tossiche con le quali sono venute a contatto.

CARATTERISTICHE DELLE PERSONE	DESCRIZIONE
Genere	Una delle caratteristiche che distingue gli uomini dalle donne nel comportamento in caso d'incendio, rilevato nel corso di diversi anni, riguarda la maggiore attitudine degli uomini a tentare di combattere l'incendio, a differenza delle donne che sono più pronte a fuggire e ad avvertire le altre persone presenti. Tale dato potrebbe essere soggetto a mutare nel corso degli anni, in relazione ai lavori che le donne svolgono nelle attività lavorative, sempre più vicini a quelli degli uomini.
Età	La variazione delle capacità in relazione all'età è scomponibile nelle tre categorie delle capacità, del processo decisionale e delle azioni. La variazione delle prestazioni fisiche è l'aspetto più rilevante nella resistenza all'esposizione agli agenti tossici e irritanti.

Tabella 7.1 - Schematizzazione della risposta umana in relazione alle caratteristiche più significative delle persone che possono essere presenti nell'ambiente da evacuare.

7.4 LA RISPOSTA AGLI INDIZI

Il processo di risposta agli indizi è composto dalle tre fasi della ricezione (sentire fisicamente), del riconoscimento (riconoscere come tale l'indizio) e dell'interpretazione (dare all'indizio il suo significato).

La valutazione di tale comportamento può essere svolta solo dopo che siano state identificate le caratteristiche del gruppo di persone esposte al rischio.

Per indizi, ai fini della sicurezza antincendio, si intendono i prodotti della combustione, i segnali di allarme, le comunicazioni da parte di altre persone e l'interruzione dei servizi dell'ambiente in cui ci si trova.

I prodotti della combustione sono presenti, di solito, nell'ambiente interessato dall'incendio, ma possono essere percepiti anche in altre aree. Il contatto con i prodotti della combustione può avviare anche il processo di allarme nei riguardi di altre persone presenti nell'ambiente considerato.

Per quanto riguarda i segnali generati da un sistema automatico di allarme si deve considerare il fatto che essi possono essere interpretati in modo diverso. La loro rilevanza ai fini della decisione delle azioni da adottare deve quindi essere valutata specificamente. Anche l'efficacia dell'avvertimento diretto da parte di altre persone deve essere valutato allo stesso modo.

L'interruzione dei servizi può essere un indizio importante soprattutto per le persone che si trovano in ambienti distanti o isolati. In questo caso l'ambiguità connessa al tipo di comunicazione deve essere valutata in relazione alla frequenza con cui può verificarsi.

In generale si deve ricordare, sulla scorta dell'esperienza di incendi reali, che le persone iniziano l'esodo solo immediatamente dopo la ricezione dei primi indizi. Trascorre cioè, necessariamente, una discreta quantità di tempo per l'elaborazione del messaggio ricevuto. Tale tempo è definito nella letteratura tecnica come tempo di validazione dell'indizio.

La ricezione dei segnali di allarme dipenderà dalle capacità percettive dell'individuo e dalle caratteristiche di percepibilità del segnale. È stato sottolineato che la realizzazione di sistemi di allarme di solito presuppone che i sistemi stessi mettano in grado i presenti di avviare l'esodo di emergenza con un ritardo minimo. Quasi senza eccezione, invece, i dati sperimentali contraddicono questa presunzione e suggeriscono l'idea che un allarme da solo non avvii l'esodo ma dia inizio alla ricerca di ulteriori indizi, e cioè alla fase di conferma dell'indizio.

7.5 L'ASPETTO PSICOLOGICO DELL'EVACUAZIONE

Secondo la definizione classica di panico data da Fritz e Marcks, il panico in un individuo è causato da due fattori: si riconosce di essere in immediato pericolo di vita e si ritiene che la possibilità di scampare al pericolo sia sempre più piccola.

Il concetto di panico è spesso usato dai media quando descrivono il comportamento umano durante un processo di evacuazione. Inoltre è spesso usato dalla stessa gente per spiegare a se stessa o agli altri la propria anticipata reazione ad un evento imprevisto. Il panico è considerato, cioè, come un comportamento non razionale poiché spesso appare come non desiderabile.

Tuttavia, diversi ricercatori sono concordi nell'affermare che le situazioni di panico soltanto raramente hanno un impatto sulle condizioni di evacuazione da una situazione d'incendio. Solitamente è la scarsità di informazione che alimenta comportamenti errati, non il panico.

7.5.1 Le famiglie e la familiarità dei percorsi

Quando si cerca di modellare il comportamento della gente è opportuno tenerne in considerazione il contesto sociale. Anche quando il pericolo della morte è concreto, la gente tende a comportarsi come un gruppo per affrontare compatta le difficoltà. Il comportamento di aggregazione nei confronti di un incendio è un fatto evidenziato da diversi autori. Una folla costituita da gente che non interagisce tra loro è un'assunzione assolutamente irrealistica, anche se sono tanti i modelli che la calcolano così.

Pan dice "la gente che arriva insieme ad una via d'uscita tende a muoversi in concerto l'uno con l'altro, orienta le proprie azioni allo stesso modo, e si allontana insieme". Questo equivale a dire che le azioni eseguite da due membri dello stesso gruppo non sono indipendenti tra loro. Pan afferma altresì che questo tipo di aggregazione comporta che:

1. il flusso di uscita è più fluido in quelle geometrie nelle quali i gruppi possono muoversi congiuntamente, piuttosto che allontanarsi o disporsi in fila.
2. un gruppo tende a ricomporsi prima di uscire;
3. i gruppi che sono gerarchicamente organizzati, come genitori e figli, avranno probabilmente un comportamento differente dai gruppi che non lo sono.

Gli evacuanti solitamente preferiscono per la fuga le stesse porte dalle quali sono entrati. Questo avviene anche quando questa scelta non è la più sicura tra altre scelte possibili. Tale tendenza si enfatizza in conseguenza di un incendio perché la gente immagina che intraprendere un percorso non conosciuto possa aumentare il rischio. Per esempio le uscite di emergenza potrebbero non essere utilizzate per paura di essere condotti verso un percorso sconosciuto. Questo evidenzia l'importanza di non delegare in maniera esclusiva alle uscite di emergenza il compito di risolvere l'equazione, soprattutto quando queste non coincidono con i percorsi di uso giornaliero.

7.5.2 Le decisioni e lo stress

Una persona che deve decidere come evacuare una struttura che ha preso fuoco lo fa sotto stress. Janis e Mann affermano che le decisioni prese sotto circostanze stressanti hanno due principali differenze rispetto alle decisioni prese quotidianamente: la scelta è difficile ed il tempo è limitato. Una terza differenza aggiunta da Prolux è l'incompleta ed eccezionale natura dell'informazione in base alla quale devono decidere.

Lo stress causato da un tempo limitato è un fattore estremamente importante durante un'evacuazione perché esso non permette una corretta valutazione delle circostanze ed aumenta la probabilità che le informazioni siano recepite in maniera incompleta. Questo può comportare difficoltà non indifferenti nell'individuazione delle vie d'uscita. D'altro canto gli effetti dello stress sono considerati necessari e positivi perché inducono anche un effetto di iperattività durante una situazione di pericolo.

Lo stress inizia quando si ricevono informazioni ambigue e non va via finché l'evacuato non si è stabilizzato in un luogo sicuro per un discreto tempo. Lo stress limita la capacità di interpretazione delle informazioni, ad esempio un evacuante può non accorgersi dei segnali che indicano le uscite di emergenza ripiegando sulle vie conosciute.

7.5.3 Effetti di tipo sociale: maggioranze e minoranze

Nella prova classica di Asch, che consisteva nella stima visuale della lunghezza di una linea retta, tre quarti dei partecipanti al test diedero almeno una risposta sbagliata seguendo l'esempio di partecipanti falsi. Gli stessi dati rivelarono inoltre che oltre il 37% dei partecipanti reali, fu influenzato dalle risposte dei partecipanti falsi. Secondo Asch, questo risultato dimostra l'evidente desiderio di seguire la maggioranza.

La teoria dell'effetto di maggioranza può essere usata per modellare la probabilità che un evacuante si conformi ad essa nello scegliere un determinato percorso di uscita durante l'evacuazione. Se la maggioranza degli evacuanti ha preso una decisione diversa su un percorso di uscita, un individuo può sentire una certa pressione ad effettuare una scelta diversa.

Le minoranze possono influenzare le decisioni fatte dalla maggioranza se la minoranza si comporta coerentemente e logicamente, e se i punti di vista della minoranza sono chiaramente definiti. Nel lavoro sperimentale di Moscovici si trova che se una minoranza dello 0,25% assume un comportamento coerente, può riuscire ad influenzare anche il 10% del complesso degli individui. Questo fa si che le minoranze sperino nella loro influenza.

Mentre le maggioranze provocano principalmente la tendenza a conformarsi, le minoranze possono provocare revisioni delle opinioni personali. In situazioni di evacuazione, una minoranza decisa può incoraggiare qualcuno a rinunciare al percorso scelto ed a seguire la minoranza piuttosto che la maggioranza.

CAPITOLO 8

I MODELLI COMPUTAZIONALI

8.1 INTRODUZIONE ALLA MODELLAZIONE NUMERICA

Lo studio dei progetti nella fire engineering può essere svolto sia in maniera diretta, approntando le necessarie esperienze a scala reale o a scala ridotta e analizzando i dati raccolti da una rete di sensori, sia utilizzando dei modelli matematici che permettono di ricostruire i test necessari esclusivamente con l'ausilio del computer.

L'idea che un fuoco potesse essere studiato numericamente risale, probabilmente, agli albori dell'era informatica. Infatti, le equazioni fondamentali della fluidodinamica, del trasferimento di calore e della combustione, che costituiscono la base dei moderni e complessi modelli di calcolo, sono state formulate e descritte più di 100 anni addietro.

D'altro canto, a causa dell'innata complessità del fuoco e dell'innumerevole quantità di scenari possibili, il calcolo computazionale di questi fenomeni ha avuto inizio solo vent'anni addietro.

Due sono gli approcci possibili: probabilistico e deterministico.

I modelli probabilistici sono basati sul concetto di rischio e forniscono valutazioni che nascono dalle esperienze del passato.

I modelli deterministici forniscono invece un approccio matematico rigoroso, basato sulle leggi della fisica, variando da semplici correlazioni a complessi modelli che richiedono elevati tempi di calcolo.

Ci troviamo dunque nell'ambito dei sistemi **CFD**: **C**omputational **F**luid **D**ynamic, ovvero nell'ambito della Fluido Dinamica Computazionale che può definirsi come "un'analisi numerica, con l'ausilio del calcolatore, delle condizioni di moto di fluidi per l'applicazione allo studio di fenomeni fisici di interesse nei campi dell'ingegneria".

L'obiettivo della CFD è quello di risolvere il campo di alcune grandezze fisiche di interesse a seconda del problema in oggetto (determinare cioè i valori di velocità, pressione, temperatura, concentrazione di specie chimiche, presenza di specie inquinanti, etc.), **in ogni punto** del dominio, corrispondente alla regione di spazio oggetto di studio (edificio,

camera di combustione, condotto di aspirazione di un ventilatore, etc.), **per tutti gli istanti di tempo** di interesse nel caso di fenomeni transitori (non stazionari).

Questi metodi numerici hanno il pregio di poter economizzare risorse umane e tecnologiche necessarie all'esecuzione dei test sperimentali, nonché permettono di svincolarsi dai vincoli spaziali e di sicurezza che un test a piena (ma anche a piccola) scala necessita.

Lo scotto che questo approccio chiede di pagare è su due piani distinti;

- è necessaria una elevata potenza di calcolo per ottenere alti livelli di precisione, per cui è fondamentale disporre di risorse tecnologiche ed informatiche molto avanzate;
- è necessario un certo know-how sull'hardware e sul software che si intendono utilizzare.

8.2 I MODELLI NUMERICI CFD

È possibile trovare sul mercato soluzioni specifiche alla maggior parte dei problemi inerenti alla sicurezza antincendio (dinamica del plume, dinamica del fuoco, crash delle superfici vetrate, esplosioni, propagazione dell'incendio, composizione della fase gassosa, visibilità, stress termico delle strutture in seguito al flashover, etc.), ma il loro impiego deve essere fatto alla luce di due importanti nozioni:

- tutti i modelli sono ricavati ed ottimizzati per risolvere una certa classe di situazioni, per cui un dato software può non essere adatto a risolvere altre situazioni per le quali il grado di approssimazione sarebbe troppo elevato;
- tutti i modelli hanno dei limiti di validità per cui anche se apparentemente la situazione è risolvibile con tale approccio, ed il grado di approssimazione è compatibile con le esigenze del progetto, è possibile che non si riesca a soddisfare contemporaneamente ulteriori vincoli (di natura geometrica, termica, fluidodinamica, o altro) inficiando il risultato della simulazione e rendendolo errato.

La consapevolezza di questi aspetti è necessaria perché molto spesso i software non includono delle routine per la verifica del rispetto di tutti i vincoli, ma gli algoritmi di calcolo forniscono comunque dei risultati. Per questo è indispensabile capire se questi risultati siano o meno corretti per gli scopi posti.

Distinguiamo le seguenti categorie di modelli:

- modelli a zone;
- modelli di campo;
- modelli post-flashover;
- modelli multifunzionali.

8.2.1 Modelli a zone

Un modello a zone calcola le condizioni che si determinano nell'ambiente dividendo ogni compartimento in due zone omogenee. Una è quella superiore, dei fumi e gas caldi prodotti dalla combustione. L'altra è la zona inferiore, libera da fumo e più fresca di quella superiore. Il rapporto di altezza tra le due zone cambia con lo sviluppo dell'incendio.

I modelli a zone stimano in funzione del tempo:

- le temperature (medie) dello strato inferiore e superiore;
- la posizione dell'interfaccia tra le zone;
- la concentrazione di ossigeno;
- la concentrazione di ossido di carbonio;
- la visibilità;
- il flusso in entrata ed in uscita dalle aperture verso l'esterno o verso altri locali.

Tali informazioni sono essenziali per stimare le condizioni di sostenibilità di un compartimento o per determinare se si può verificare il flashover. I modelli a zone si applicano sia ad ambienti semplici, che ad ambienti collegati tra loro da aperture. I dati di input per i modelli a zone variano dal modello e dalle informazioni che si desidera ottenere.

Generalmente, in questi modelli i dati di input sono molto più esigui rispetto a quelli richiesti per i modelli di campo. Sono necessari dati sulla geometria del compartimento e sulle dimensioni delle aperture. La conoscenza delle proprietà termiche delle pareti di confine del compartimento è necessaria per stimare la dispersione del calore attraverso muri, soffitto, solai, etc..

Inoltre, deve essere fornita, tra i dati di input, anche la dimensione del focolaio iniziale.

8.2.2 Modelli di campo

I modelli di campo forniscono la stima dell'evoluzione del fuoco in uno spazio tridimensionale risolvendo il campo fluidodinamico che risulta dall'incendio.

Questo approccio è sviluppato a partire dalle equazioni di conservazione che governano il campo (della massa, dell'energia, della quantità di moto) e dalle equazioni necessarie a descrivere il fenomeno (reazioni chimiche di combustione, decadimento delle particelle infiammate, leggi di crescita del fuoco, etc.).

Attraverso i metodi delle differenze finite, degli elementi finiti o degli elementi di confine, o altri, si giunge alla determinazione delle grandezze fondamentali del fenomeno (velocità, concentrazioni, temperatura, etc.) in un certo numero di sottospazi nei quali l'ambiente è stato suddiviso.

Ogni sottospazio viene descritto da un nodo della maglia di calcolo; per gli altri punti si ricavano i dati per interpolazione. Questo implica che una maglia molto fitta garantisce minori errori di interpolazione e dati più esatti; questo si accompagna, però, ad un onere aggiuntivo di calcolo ed a tempi più lunghi per completare la simulazione.

Tra i vari modelli di campo si differenziano altre sottocategorie in base alle equazioni scelte per modellare la turbolenza (DNS e LES sono le categorie più recenti). I risultati ottenibili sono bi o tridimensionali e molto più dettagliati di quelli ottenibili con i modelli a zone, ma molte applicazioni non necessitano di questa raffinatezza; è quindi consigliabile utilizzare metodi più semplici evitando l'onere del tempo di calcolo.

Così come per i modelli a zone, i modelli di campo richiedono la descrizione del compartimento e delle aperture, ma in realtà permettono di simulare anche spazi non compartimentati, come i plumi ed i camini. Il parametro di input più importante è il valore dell'HRR che, opportunamente definito, identifica la taglia del fuoco e la sua crescita nel tempo.

Nei modelli che non eseguono un bilancio stechiometrico delle specie interessate dalla combustione e che quindi non valutano la scomparsa dell'ossigeno, si deve verificare che l'HRR sia compatibile con l'ossigeno presente nell'ambiente, in quanto al di sotto di una certa concentrazione di ossigeno la combustione si arresta. Si possono anche avere indicazioni sulla dispersione termica una volta definite le caratteristiche delle interfacce dell'ambiente.

8.2.3 Modelli post-flashover

I modelli post-flashover calcolano l'andamento della temperatura nel tempo risolvendo le equazioni di conservazione dell'energia, della massa e delle specie. Anche se non sono utili per la stima della sicurezza delle persone, perché quando si verifica il flashover le condizioni sono già da parecchio tempo insostenibili per un essere umano, questi modelli servono a stimare l'esposizione termica delle strutture dovuta a diversi carichi di incendio e permettono di valutare la possibilità di crollo o la propagazione dell'incendio ad altri compartimenti.

I dati di input per questi modelli sono svariati: oltre alle caratteristiche del compartimento e della ventilazione, sono necessarie le caratteristiche del combustibile, l'efficienza e la quantità di combustibile disponibile.

8.2.4 Modelli multifunzionali

Questi modelli più complessi sono utili in quanto capaci di ottenere una prima stima dei molteplici aspetti da analizzare durante l'incendio.

Le routine che essi implementano si prestano a gestire i flussi di ventilazione, il calore irraggiato dagli oggetti, il funzionamento degli sprinkler, l'esodo degli occupanti e la dimensione del plume. In questa categoria rientrano anche i modelli che analizzano la propagazione della fiamma ed utilizzano le proprietà dei materiali desunti da test a piccola scala (proprietà termiche superficiali, temperature di innesco, parametro di propagazione laterale della fiamma) per stimare la propagazione su differenti tipi di superficie.

In genere questi modelli servono a studiare un particolare del fenomeno "incendio" e quindi sono molto specializzati, permettono di gestire geometrie molto semplici, ma la stima dell'HRR eseguita in base alle effettive caratteristiche dei materiali incendiati fornisce un andamento nel tempo molto accurato.

Altri modelli sono dedicati allo studio delle cinetiche chimiche (e nulla dicono sul comportamento dei fumi), altri ancora sono studiati per prevedere la rotture delle superfici vetrate (evento fondamentale nella dinamica di un incendio in quanto variando drasticamente la superficie di ventilazione la combustione accelera e il fuoco raggiunge il massimo HRR, il flashover), altri si interessano della dinamica delle faville in ambiente ed al conseguente rischio innesco di nuovi focolai. Di questi modelli non esistono attualmente versioni commerciali in quanto sono fondamentalmente strumenti di ricerca.

8.3 I MODELLI NUMERICI DI EVACUAZIONE

Fino ad oggi, la capacità di evacuazione di una struttura, in fase di progetto o verifica, è stata principalmente valutata sulla base di criteri, relativamente semplici, sulla larghezza e sulla lunghezza dei percorsi di evacuazione. Questi criteri sono basati principalmente sulle lezioni apprese dagli incidenti del passato e sui risultati di esperimenti a scala reale.

Nei modelli numerici di simulazione dell'esodo gli occupanti sono considerati prossimi alle uscite fin dal primo istante di evacuazione ed il calcolo è dedicato principalmente ai soli punti di connessione tra le varie parti della struttura nonché tra questa e l'esterno.

Al fine di ottenere schematizzazioni più realistiche della realtà, la tecnica moderna ha cominciato a dedicare una forte attenzione alla modellazione numerica anche nel campo dell'esodo, dimostrando che questo strumento è più che valido per definire le condizioni di sicurezza di una struttura in chiave prestazionale.

Allargando poi il campo di esplorazione della sicurezza a strutture quali i moderni centri commerciali o i tunnel, o a tutte quelle altre strutture in cui sono presenti centinaia o migliaia di individui, o che per la loro conformazione presentano particolari criticità, occorrono modelli capaci di simulare anche le dinamiche sociali di una folla.

Sia le tecniche tradizionali, che i primitivi modelli di simulazione dell'esodo, non sono in grado di tenere in debito conto gli effetti, fisici o psicologici, della pressione di una folla di persone su di un singolo individuo. Le moderne esigenze di sicurezza impongono dunque l'adozione di modelli di calcolo numerico dell'esodo basati sul comportamento degli individui oltreché sul loro movimento.

8.3.1 Caratteristiche generiche di un modello di evacuazione

I modelli automatici utilizzati nell'approccio prestazionale sono soprattutto quelli che prioritariamente simulano l'incendio. Il principale motivo di questa maggiore notorietà deriva dalla maggiore disponibilità di dati oggettivi rispetto a quelli che costituiscono la base dei modelli di previsione del comportamento umano.

Negli ultimi anni si è però manifestato uno sviluppo molto rapido dei modelli di esodo, alcuni dei quali utilizzano direttamente al loro interno dei modelli di simulazione dell'incendio. In questo modo, il comportamento umano viene ad essere simulato istante per istante considerando anche le condizioni ambientali così come si modificano nel tempo.

I modelli di simulazione dell'esodo sono molto differenti l'uno dall'altro. Nella scelta di un modello bisogna considerare bene le caratteristiche e le funzionalità per le quali esso è stato sviluppato. Bisognerà cioè valutare:

- **la finalità**, ovvero l'attitudine del modello a simulare il particolare scenario d'interesse;
- **il metodo di modellazione dell'azione degli umani**, a seconda che esso sia di puro movimento, di movimento condizionato dal comportamento o di movimento condizionato solo parzialmente dal comportamento. Si distinguono:
  Modelli di movimento che muovono le persone da un punto ad un altro (dalla posizione iniziale all'uscita) e sono particolarmente utili nell'evidenziare i punti di congestione, le code, i colli di bottiglia all'interno dello spazio simulato.
  Modelli comportamentali che tengono conto delle azioni compiute dalle persone oltre al loro movimento verso l'uscita. Questi modelli possono tenere conto anche del processo di decisione da parte delle persone o delle azioni compiute nel contesto ambientale specifico. In alcuni casi sono considerate anche le capacità di valutazione del rischio.
  Modelli parzialmente comportamentali che calcolano in primo luogo il movimento delle persone, ma forniscono anche alcuni condizionamenti dovuti al comportamento.
- **la struttura matematica del modello**, a seconda di come la base numerica del modello considera e divide e lo spazio del dominio di interesse. Lo spazio di evacuazione può essere bi o tridimensionale, continuo o discretizzato secondo una griglia che può variare in dimensioni. La suddivisione può essere grossolana (archi e nodi) oppure può essere costituita da una griglia più o meno fitta di volumi elementari che caratterizzano lo spazio in modo continuo.
- **la prospettiva del modello e la prospettiva delle persone**, in base a come il modello vede gli occupanti ed in base a come gli occupanti vedono il modello.
  Esistono modelli capaci di tenere traccia individualmente di ogni persona e modelli che eseguono solo valutazioni di tipo globale. Anche per quanto riguarda la possibilità di mostrare come viene visto lo spazio dalle persone che si muovono al suo interno, il modello può fornire una visione globale o individuale. Nel caso della visione individuale, la simulazione è più vicina alla situazione di coloro che non conoscono la posizione delle vie di esodo e che decidono il loro percorso sulla base delle informazioni che apprendono, dall'esperienza e dalle persone vicine.

- **il comportamento delle persone**, a seconda di regole predefinite, analogie funzionali, regole di intelligenza artificiale o assegnando probabilità di comportamento a gruppi specifici. Ovviamente non tutti i modelli consentono la simulazione dell'influenza del comportamento sull'esodo. In alcuni casi, inoltre, si può assegnare una distribuzione probabilistica al tempo di pre-movimento, alle velocità di esodo, all'effetto del fumo attraverso la FED (fractional effective dose);
- **il movimento delle persone**, in relazione a come è gestito il movimento degli evacuanti. La maggior parte dei modelli prevede una velocità di percorrenza libera, corrispondente cioè a bassi valori di densità (persone / m^2). Quando si verifica la formazione di code o di congestioni ogni modello adotta poi la propria strategia. Infatti, tali situazioni possono essere trattate in maniera molteplice e con strategie combinate di vari approcci.
- **l'uso dei dati di incendio**, a seconda della eventuale multifunzionalità del modello che può implementare al suo interno ulteriori routine per il calcolo delle caratteristiche di un dato incendio, combinando le equazioni del movimento direttamente con tali informazioni. Altri possono ricavare questi dati più o meno indirettamente da software dedicati alla sola dinamica dell'incendio.
- **la capacità di visualizzazione**, a seconda della possibile visualizzazione dei risultati, che serve soprattutto a mettere in evidenza dove si possono creare colli di bottiglia o code;
- **gli studi sulla validazione**, che può essere svolta rispetto a delle previsioni normative, rispetto a dati desunti da esercitazioni o da sperimentazioni sull'esodo, oppure rispetto a dati di letteratura o rispetto ad altri modelli;
- **i limiti di applicazione e le caratteristiche di impiego**, a seconda della relativa disponibilità di dati sperimentali di studio propri del modello. Se tale problema riguarda le caratteristiche fisiche dell'esodo (velocità, densità), nel caso dei parametri che condizionano il comportamento deve essere nota l'incertezza posta alla base della loro determinazione.

Indipendentemente dalle funzionalità del singolo modello, è ipotizzabile che nel futuro quelli comportamentali raggiungano una diffusione maggiore, legata alla loro capacita più evoluta di rappresentare ciò che costituisce il principale scopo della valutazione, e cioè la capacità di esodo delle persone.

CAPITOLO 9

APPROFONDIMENTI SUL CODICE FDS+EVAC

9.1 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CAMPO

Il programma che si è deciso di utilizzare in questo lavoro è il software **FDS** (**F**ire **D**ynamics **S**imulator), sviluppato e distribuito gratuitamente dal **NIST** (**N**ational **I**nstitute of **S**tandards and **T**echnology). Il programma FDS è l'implementazione in FORTRAN di un modello multifunzionale avanzato che offre la potenza di un modello di campo ma che può gestire situazioni particolari come l'utilizzo di sprinkler, l'utilizzo di un sistema di ventilazione, precise cinetiche di combustione e altri aspetti importanti del fenomeno "incendio" tra cui l'evacuazione degli occupanti con la recente implementazione del modulo **EVAC**, sviluppato dal **VTT** (Technical Research Centre of Finland).

Il modello matematico è stato elaborato per lo studio del campo fluidodinamico che si determina quando c'è una sorgente di calore che riscalda delle masse d'aria; in esso sono state integrate molte funzionalità avanzate che esulano dalla stretta categoria dei modelli di campo e che quindi pongono il software in una fascia di prodotti più evoluta.

Il modello è stato studiato per quelle categorie di fluidi che si muovono con velocità subsoniche (basso numero di Mach); grazie a questa ipotesi iniziale si è giunti all'implementazione della risoluzione del campo fluidodinamico con una formulazione semplificata delle equazioni di Navier-Stokes.

Le equazioni ellittiche così ottenute possono essere applicate efficacemente allo studio dei moti a bassa velocità ed ai processi di scambio termico convettivo. Il calcolo può essere eseguito in due modalità distinte: **DNS** (**D**irect **N**umerical **S**imulation) e **LES** (**L**arge **E**ddy **S**imulation).

La sostanziale differenza è che la modalità DNS prevede il calcolo dei termini dissipativi in maniera diretta, mentre la modalità LES trascura i fenomeni di piccola scala utilizzando un approccio empirico sviluppato da Smagorinsky.

Il metodo DNS risulta più esaustivo, ma molto più oneroso; utilizzando un approccio (k-ε) per la risoluzione del campo, il metodo porta ad una modellizzazione della turbolenza più corretta (le equazioni vengono risolte per tutte le scale spazio-temporali).

Il metodo LES, invece, calcola direttamente solo le grandezze turbolente di grande scala e stima quelle di piccola scala con algoritmi semi-empirici semplificati; il risultato è una drastica riduzione dei tempi di calcolo che permette l'analisi di fenomeni di durata maggiore.

Nel software sono stati inseriti entrambi gli approcci perché il loro uso è subordinato alla tipologia di problema che si vuole analizzare. Per le prove di laboratorio nelle quali è necessaria una precisione maggiore (e/o le dimensioni fisiche sono ristrette e/o è opportuno seguire l'evoluzione delle singole specie gassose) è opportuno scegliere il metodo DNS perché il metodo LES dovrebbe essere applicato ad una griglia di calcolo molto fitta e risulterebbe inutilmente lento e molto impreciso.

Al contrario, quando è necessario studiare ambienti di dimensioni consistenti in cui le specie gassose sono poche e il loro comportamento molecolare è poco influente, il metodo LES è consigliabile in quanto permette di ottenere buone simulazioni del comportamento reale senza oneri di calcolo eccessivi.

Per una trattazione approfondita degli algoritmi matematici di FDS si rimanda alle bibliografie [72,73].

9.2 DESCRIZIONE TECNICA DEL SOFTWARE

Il software FDS + EVAC, di seguito per semplicità indicato esclusivamente come FDS, è il risultato della combinazione di due moduli distinti: **FDS** sviluppato dal NIST ed **EVAC** sviluppato dal VTT. Le versioni utilizzate per il lavoro di questa tesi sono la 5.20 per FDS e la 2.0 per EVAC.

Ad essi si combina un terzo software, **Smokeview**, che consente di riprodurre a video le simulazioni effettuate, evidenziando convenientemente i valori delle grandezze di interesse.

Al contrario di Smokeview, FDS non è un comune software[12]. La realizzazione di una simulazione FDS somiglia più alla compilazione di un codice di programmazione che ad altro. Per costruire anche la più complessa simulazione FDS è sufficiente infatti disporre di

[12] Esistono sul mercato soluzioni software di terze parti che permettono di lavorare alla costruzione di un file di input FDS e di eseguirne l'elaborazione attraverso un'interfaccia di tipo grafico. Nel corso del lavoro di questa tesi sono invece stati utilizzati procedimenti semi-automatici costruiti ad hoc.

un banale editor di testo. Tuttavia, data la complessità degli input di una simulazione generica, è più opportuno utilizzare editor di testo multifunzionali che permettono di evidenziare in maniera differente le varie parti del testo rendendo la lettura ed il debug del codice notevolmente più semplice.

Per eseguire una simulazione occorre dunque esclusivamente realizzare un ipertesto e passarlo all'eseguibile FDS per l'interpretazione e l'elaborazione, con l'eventuale supporto visivo di Smokeview per il debug iniziale o per la visualizzazione dei risultati nelle fasi di elaborazione o di fine simulazione.

Così come gli input anche gli output possono essere ricondotti a semplici file di testo. FDS registrerà, nel campo spazio temporale definito, tutte le grandezze che gli sarà chiesto di osservare. Successivamente, con l'ausilio di qualsivoglia strumento informatico, potrà essere effettuata un'ulteriore elaborazione di questi dati.

9.2.1 Il problema delle superfici curvilinee o inclinate

Una delle ragioni principali del successo del software FDS risiede nella semplicità della rappresentazione che esso produce dello spazio.

Poiché il dominio è suddiviso in una griglia elementare di volumi di controllo, ogni entità geometrica è funzione della griglia; di conseguenza, ogni superficie (sia essa piana o curvilinea) deve necessariamente adagiarsi lungo il contorno delle celle che la interessano, secondo un procedimento noto come "stair stepping".

Ogni superficie risulterà tanto meglio rappresentata quanto più sarà fitta la griglia che la inviluppa.

Tuttavia, in una simulazione FDS+EVAC i domini del fuoco e di evacuazione possono essere disgiunti ed avere differenti risoluzioni. Mentre il primo, tridimensionale, definisce lo spazio che interessa il movimento dei flussi, risultando così il dominio fondamentale della simulazione, il secondo, bidimensionale nel piano orizzontale, serve esclusivamente a tenere traccia delle grandezze d'interesse nelle sole zone occupate dagli evacuanti ed a condizionarne il movimento in funzione della geometria dell'ambiente.

Il disaccoppiamento dei domini FDS ed EVAC costituisce un grande vantaggio. E' possibile, ad esempio, utilizzare per il dominio di evacuazione (i cui tempi di elaborazione sono molto contenuti) celle molto piccole e modellare efficacemente anche spazi ristretti

come l'interno di un vagone, mantenendo al contempo per la simulazione complessiva ragionevoli tempi di elaborazione con l'adozione di celle FDS di dimensioni maggiori.

9.3 LA COMBUSTIONE E IL TRASPORTO DI CALORE IN FDS

Una fonte comune di confusione in FDS è la distinzione tra la combustione di un gas e la pirolisi di un solido: per **combustione** si intende sempre la reazione tra i vapori gassosi di un combustibile e l'ossigeno; per **pirolisi**, la generazione di vapori combustibili al contorno di una superficie solida o liquida.

Dal punto di vista computazionale sarebbe estremamente impegnativo risolvere le equazioni del trasporto riferendosi ad una miscela di gas piuttosto che ad un'unica specie gassosa. Gli algoritmi di calcolo FDS, pur ammettendo la possibilità di configurare più specie combustibili, ammettono infatti la dichiarazione di una sola equazione di combustione.

In ogni caso la combustione è definita sempre in termini di flussi di calore uscenti da una superficie.

La presenza di eventuali altri combustibili viene dunque modellata intervenendo sui tassi d'incendio delle superfici relative (burning rates), ovvero intervenendo sul calore prodotto dalla particolare combustione che può essere maggiore o minore di quello di riferimento.

La reazione di combustione del gas può essere modellata in due modi:

- attraverso un approccio detto "mixture-fraction" (default) che traccia il percorso del solo combustibile durante le sue trasformazioni dalla superficie di origine al processo di combustione;
- attraverso un approccio alternativo detto "finite-rate" dove tutte le specie individuali coinvolte nella combustione sono definite e tracciate individualmente. Questo secondo approccio è decisamente più complicato e costoso in termini di spesa computazionale.

All'interno dell'approccio "mixture-fraction" esistono due ulteriori vie per modellare la combustione: la prima è quella di specificare per ogni superficie un valore di HRR specifico, `HRRPUA` (Heat Release Rate Per Unit Area), eventualmente dipendente dal tempo.

L'altra via è quella di specificare un calore di reazione, `HEAT_OF_REACTION`, insieme

alle altre proprietà termodinamiche della superficie; in questo caso il tasso di combustione della superficie sarà funzione dell'apporto di calore del sistema alla superficie stessa e dunque l'evoluzione della combustione sarà nota soltanto a fine simulazione.

In entrambi i casi si sta usando l'approccio delle "mixture-fraction" e risulta inutile specificare esplicitamente le concentrazioni delle specie presenti (come l'ossigeno).

E' invece sempre necessario, come già accennato, specificare una linea (`&REAC`) che dia indicazioni circa la reazione di combustione predominante, considerando la stechiometria di base del processo. Nel caso in cui queste informazioni non siano fornite, il software, per default, considererà la reazione del propano come reazione di riferimento.

Usando il modello delle mixture-fraction ogni reazione assume la forma:

$$C_xH_yO_zN_v\,\mathrm{Altre_specie}_w + \nu_{O_2}O_2$$

$$\downarrow$$

$$\nu_{CO_2}CO_2 + \nu_{H_2O}H_2O + \nu_{CO}CO + \nu_{soot}\,\mathrm{soot} + \nu_{N_2}N_2 + \nu_{\mathrm{Altre_specie}}\,\mathrm{Altre_specie}$$

Si deve pertanto specificare esclusivamente la formula chimica del combustibile insieme ad altri parametri termodinamici o fisici quali ad esempio il tasso di produzione di CO (`CO_YIELD`) o di fumo (`SOOT_YIELD`), e l'ammontare delle eventuali altre sostanze come l'idrogeno, l'azoto e le altre specie chimiche.

Nel caso non si aggiungano ulteriori indicazioni è bene tenere presente che FDS considera l'ambiente come ben ventilato. Esistono ulteriori opzioni per considerare l'effetto di condizioni di sotto-ventilazione ma esse richiedono un livello di approfondimento più dettagliato.

Per la maggior parte delle simulazioni FDS, il processo di trasporto della radiazione termica è computato di default e l'utente non ha bisogno di settare alcun parametro affinché questo avvenga. Tuttavia possono verificarsi particolari esigenze per cui risulta necessario entrare nel dettaglio dell'algoritmo di risoluzione del trasporto radiativo. A tal proposito, il problema più importante da considerare coinvolge la frazione di energia rilasciata dal fuoco

sotto forma di radiazione termica, comunemente nota in letteratura come “radiative fraction”. Essa è funzione della temperatura della fiamma e della sua composizione chimica.

Nei calcoli che interessano griglie dell’ordine di un centimetro o maggiori, le temperature prossime alla superficie della fiamma non possono essere calcolate direttamente in termini dell’equazione di trasporto radiativo, principalmente a causa della dipendenza dalla quarta potenza della Temperatura, poiché l’errore commesso sarebbe troppo grande.

Per compensare ciò, ogni cella di confine della fiamma irradierà una frazione di energia costante e dipendente dal valore totale di energia chimica rilasciata all’interno della cella stessa. Per default il valore della frazione radiativa, `RADIATIVE_FRACTION`, è pari a 0,35 per i calcoli LES, mentre per i calcoli DNS è usata direttamente l’equazione risolutrice.

9.4 IL MODELLO DI EVACUAZIONE EVAC

Fin dal suo primo rilascio il software FDS è stato usato da un sempre crescente numero di ingegneri, compagnie, autorità ed Università per simulare lo sviluppo del fuoco.

Come già visto, le peculiarità di FDS sono principalmente le quattro riportate di seguito:

1. L’uso di algoritmi LES per la trattazione della turbolenza e di veloci risolutori di flusso.
2. La presenza del programma Smokeview per il post processing dei risultati.
3. Il formato estremamente semplice degli input che rende l’apprendimento e l’utilizzo del software molto agevole.
4. La sua libertà di utilizzo essendo FDS disponibile gratuitamente, sia in termini di codice FORTRAN che come eseguibile precompilato.

Una difficoltà intrinsecamente associata alle simulazioni di evacuazione è sempre stata quella del disaccoppiamento tra l'incendio e l’esodo, anche se alcuni software hanno previsto sin da subito una certa interazione, includendo semplici modelli a zone al loro interno o accettando i risultati di tali modelli in maniera semiautomatica. La possibilità di connettere una simulazione di evacuazione al software FDS è stata perciò un modo naturale di estendere le capacità di FDS.

Con la presente versione il processo di sviluppo e manutenzione di FDS utilizza un sistema di controllo (SVN - Sub Version Repository) condiviso sul web. I file sorgenti del

codice sono accessibili a qualsiasi utente che può inoltre richiedere, tramite opportuna procedura, miglioramenti e/o risoluzione di eventuali bug.

9.5 L'ALGORTIMO DI MOVIMENTO

L'uscita simultanea di grandi folle può facilmente provocare situazioni minacciose per la vita. Quando la folla genera un collo di bottiglia che riduce il movimento dei primi pedoni, con il resto della folla che continua a spingere in avanti, la situazione può condurre ad un congestionamento nel punto del collo di bottiglia. La pressione della parte posteriore della folla, che spinge o si insinua tra gli spazi, può creare problemi sulle prime linee di evacuanti che possono essere spinti complicando l'evacuazione dell'intera popolazione.

Per simulare realisticamente il fenomeno dell'intoppo, il modello di simulazione deve considerare le vere forze fisiche che si generano tra la folle in queste situazioni. Queste forze includono le forze di contatto tra i corpi, le forze d'attrito tra i vari pedoni e le forze che si esercitano tra questi ed i muri.

La modellazione di queste forze richiede che il dominio matematico dell'evacuazione sia continuo nello spazio.

In FDS+EVAC, ogni evacuante è seguito da un'equazione di moto. Questo approccio permette ad ogni individuo di avere proprietà personali e proprie strategie di fuga, in altre parole ogni individuo è trattato come un "agente" autonomo.

Il modello a base dell'algoritmo di movimento implementato da EVAC è il modello di forza sociale presentato da *Helbing* e *Molnár* e da *Helbing et al.*, con i cambiamenti introdotti da *Langston et al.* per includere una migliore descrizione della forma del corpo umano e considerare i gradi di libertà della rotazione. EVAC usa dunque le leggi della meccanica per seguire le traiettorie degli evacuanti nella simulazione virtuale. Ogni agente segue la propria equazione di moto:

$$m_i = \frac{d^2 \mathbf{x}_i(t)}{dt^2} = \mathbf{f}_i(t) + \xi_i(t) \tag{9.1}$$

dove $\mathbf{x}_i(t)$ è la posizione dell'agente i al tempo t, $\mathbf{f}_i(t)$ è la forza esercitata sull'agente al suo contorno, $\mathbf{m}_i$ è la massa e l'ultimo termine $\boldsymbol{\xi}_i(t)$ è una piccola forza casuale fluttuante. La

velocità dell'agente, $\mathbf{v}_i(t)$ è data dal rapporto $d\mathbf{x}_i/dt$.

Il vettore $\mathbf{f}_i(t)$ ha diverse componenti:

$$\mathbf{f}_i = \frac{m_i}{\tau_i}\left(\mathbf{v}_i^0 - \mathbf{v}_i\right) + \sum_{j\neq i}\left(\mathbf{f}_{ij}^{\text{sociali}} + \mathbf{f}_{ij}^{\text{attrito}} + \mathbf{f}_{ij}^{\text{contatto}}\right) + \sum_{w}\left(\mathbf{f}_{iw}^{\text{sociali}} + \mathbf{f}_{iw}^{\text{contatto}}\right) + \sum_{k}\mathbf{f}_{ik}^{\text{attrito}} \qquad (9.2)$$

dove la prima somma descrive le interazioni evacuante-evacuante, la sommatoria in w descrive le interazioni evacuante-muri e l'ultimo termine può essere usato per altre interazioni evacuante-ambiente come ad esempio le forze di repulsione tra esso ed il fuoco. Il primo termine di destra indica invece una sorta d'inerzia che ogni agente esercita su stesso per seguire il percorso preferito cercando di mantenere la propria velocità.

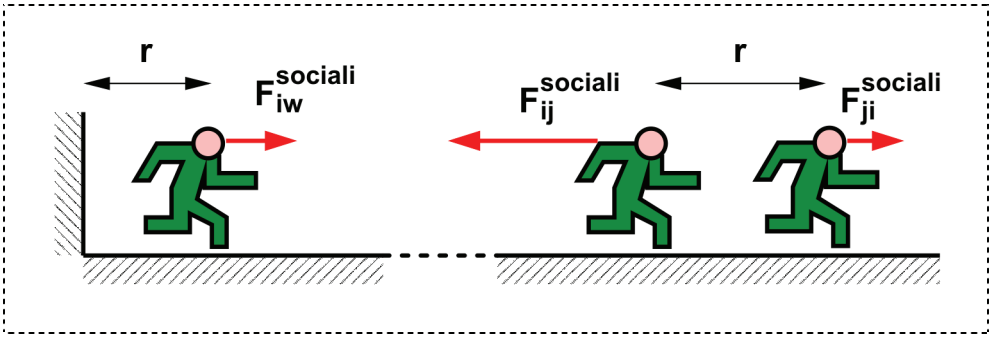

Figura 9.1 - Il concetto di forze sociali in EVAC.

Una descrizione più dettagliata dei singoli termini può trovarsi nel manuale tecnico FDS+EVAC [74].

Ogni agente individua il proprio percorso verso l'uscita in funzione del campo di flusso che avrebbe un fluido virtuale, bidimensionale e incomprimibile, per il campo di potenziale generato dalle medesime condizioni al contorno. Il risolutore di flusso FDS è utilizzato da EVAC per calcolare un approssimazione di questo campo di moto, attribuendo al fluido virtuale elevata viscosità e ridotta velocità in modo da non avere vortici nella soluzione.

Secondo il modello proposto da Langston gli evacuanti sono modellati sulla combinazione di tre cerchi elastici solidali che si muovono su un piano bi-dimensionale. Questo aspetto rappresenta l'evoluzione del primitivo modello ad un solo cerchio. I tre

cerchi, infatti, descrivono la forma del corpo umano in maniera molto più realistica permettendo inoltre di considerare gli ulteriori gradi del movimento dovuti alla rotazione.

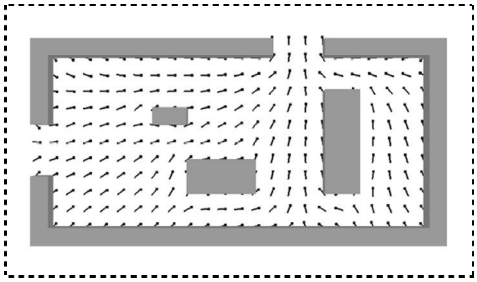

Figura 9.2 - Un semplice esempio del campo di moto che guida gli evacuanti in FDS+EVAC.

La larghezza del corpo e la velocità di evacuazione in assenza di ostacoli, per le differenti categorie predefinite di FDS+EVAC, sono riportate nella Tabella 9.1.

Usando FDS come piattaforma di calcolo, EVAC ha facile accesso a tutte le proprietà dell'incendio, come la temperatura dei gas, la densità dei fumi e dei gas, e i livelli di radiazione termica.

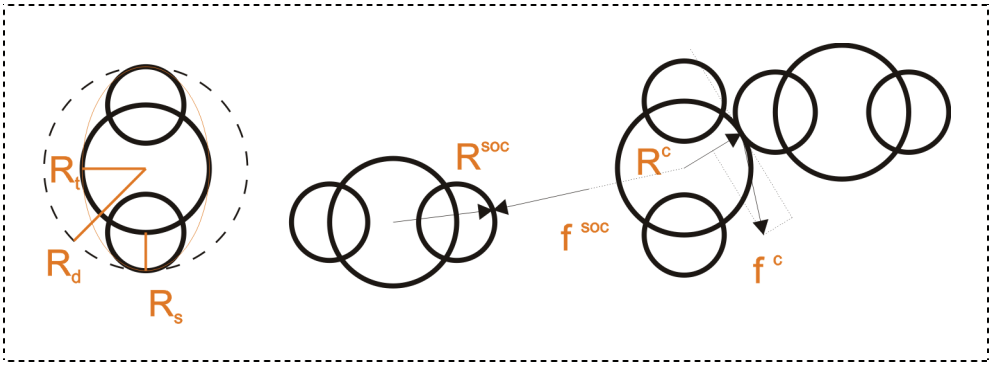

Figura 9.3 - Rappresentazione matematica degli umani in FDS+EVAC.

Il fuoco influenza le condizioni di evacuazione: esso può incapacitare gli umani ed in alcuni casi bloccare i percorsi d'uscita principali. Contemporaneamente gli evacuanti possono influenzare il fuoco, aprendo porte e finestre ed attuando vari dispositivi di protezione.

La presente versione di FDS+EVAC permette di considerare esclusivamente l'effetto del fumo sul movimento e l'influenza di alcuni gas tossici sull'organismo, ma non l'effetto del calore o l'effetto inverso delle azioni degli individui sul fuoco.

PERS_ID	R_d (m)	R_t/R_d	R_s/R_d	d_s/R_d	velocità (m/s)
Adult	0,255 ± 0,035	0,5882	0,3725	0,6275	1,25 ± 0,30
Male	0,270 ± 0,020	0,5926	0,3704	0,6296	1,35 ± 0,20
Female	0,240 ± 0,020	0,5833	0,3750	0,6250	1,15 ± 0,20
Child	0,210 ± 0,015	0,5714	0,3333	0,6667	0,90 ± 0,30
Elderly	0,250 ± 0,020	0,6000	0,3600	0,6400	0,80 ± 0,30

Tabella 9.1 - Distribuzioni della velocità di esodo libero e delle dimensioni del corpo delle varie categorie di evacuanti presenti per default. La distanza tra i cerchi delle spalle è pari a $d_s = R_d - R_s$. Per la definizione delle altre grandezze è di riferimento la Figura 9.3.

Il fumo riduce la velocità di evacuazione a causa dell'abbassamento della visibilità e del suo effetto asfissiante ed irritante. Tale effetto è governato dall'equazione sviluppata da Frantzich e Nilson, che effettuarono degli esperimenti per valutare l'effetto del fumo sulla velocità di esodo degli umani, usando concentrazioni più elevate di quelle utilizzate da Jin:

$$\mathbf{v}_i^0(K_s) = \frac{\mathbf{v}_i^0}{\alpha}(\alpha + \beta \cdot K_s) \tag{9.3}$$

dove $\mathbf{K_s}$ [m^{-1}] è il coefficiente di estinzione ed α e β sono delle costanti sperimentali.

L'interazione tra incendio ed evacuanti è monodirezionale. L'effetto dei gas tossici sugli umani è modellato usando il concetto della FED di Purser in una versione semplificata che tiene conto esclusivamente degli effetti di CO, CO_2 e O_2. Una persona è considerata incapace di proseguire l'esodo quando la FED eccede l'unità.

Un evacuante incapacitato è modellato come un agente che non esercita nessuna forza sociale sugli altri agenti e la cui velocità di evacuazione è posta uguale a zero.

La dimensione di un agente incapacitato non varia, in altre parole esso rimane sui propri piedi. Questo è effettivamente un modello primitivo e necessita di essere modificato nelle prossime versioni di FDS+EVAC.

Il vantaggio principale del modello di Helbing è che le sue equazioni sono basate sulle forze effettive che si generano tra la folla. La simulazione di queste forze è il requisito principale di una corretta simulazione e per questo l'approccio di Helbing risulta il miglior approccio possibile.

Un'altra grande caratteristica del modello è la possibilità di implementare con facilità differenti comportanti per diverse categorie di occupanti. Questo è possibile intervenendo sulla velocità di esodo libero e sulla direzionalità dello stesso, in modo da simulare diverse situazioni. Ad esempio nel comportamento di un anziano (elderly), la direzione del moto può essere impostata puntando agli altri evacuanti piuttosto che puntando direttamente alle uscite.

9.5.1 Il processo di selezione delle uscite

Nel modello di calcolo EVAC, ogni evacuante osserva la posizione degli altri individui e seleziona il proprio percorso d'uscita valutando quello apparentemente più veloce. La selezione dell'uscita è modellata come un problema di ottimizzazione, per il quale ogni evacuante tenta di selezionare l'uscita che minimizza il proprio tempo di evacuazione.

Il tempo di evacuazione che ogni evacuante tenta di ottimizzare consiste nella somma del tempo di cammino e del tempo in coda. Il tempo di cammino è valutato semplicemente dividendo la distanza per la velocità di cammino, mentre il tempo valutato per la coda è una funzione della posizione e delle azioni degli altri evacuanti. Nella realtà di un'evacuazione, si presume che un individuo cambi il percorso inizialmente scelto soltanto in presenza di un'alternativa che appare chiaramente migliore. Questo comportamento è simulato dall'algoritmo attraverso un parametro che viene sottratto al tempo stimato per l'imbocco dell'uscita scelta.

A parte quanto evidenziato sopra, esistono altri fattori che influenzano il processo di decisione degli evacuanti. Questi sono fattori legati al fuoco, alla familiarità delle uscite considerate ed alla visibilità delle singole uscite. L'effetto di questi fattori è preso in considerazione aggiungendo condizioni al problema di minimizzazione.

Secondo i tre fattori menzionati, le uscite sono divise in sette gruppi in modo che ogni uscita appartenga ad un determinato gruppo. I gruppi sono dati da un ordine di preferenza.

La familiarità di ogni uscita per ogni gruppo di evacuanti può essere determinata

dall'utente nel file di input. E' anche possibile dare una probabilità per la familiarità di un'uscita, e FDS+EVAC ne farà una trattazione casuale.

La visibilità di un'uscita per ogni agente è determinata prendendo in considerazione l'effetto di intasamento del fumo e gli ostacoli. Il possibile effetto intasamento di altri agenti non è considerato nella attuale versione del programma.

L'esistenza di condizioni di disturbo a causa dell'incendio è valutata sulla parte visibile del percorso di instradamento all'uscita. Per condizioni di disturbo si intendono quelle condizioni che disturbano l'evacuante, come la temperatura o il fumo ma che non sono letali. Se ci sono condizioni letali su un percorso d'uscita, l'uscita non ha preferenza.

L'algoritmo di selezione delle uscite consiste così di due fasi: prima le uscite sono classificate in gruppi di preferenza secondo la Tabella 9.2, e successivamente viene scelta, tra le uscite preferite quella che minimizza il tempo di evacuazione.

Scale di Preferenza	Visibile	Familiare	Presenza di condizioni di disturbo
1	si	si	no
2	no	si	no
3	si	no	no
4	si	si	si
5	no	si	si
6	si	no	si
No preferenza	no	no	no
No preferenza	no	no	si

Tabella 9.2 - Ordine di preferenza dell'algoritmo di selezione delle uscite di EVAC.

Le ultime due righe della Tabella 9.2 non hanno preferenza perché un evacuante non può essere a conoscenza di un'uscita poco familiare ed invisibile.

Secondo la letteratura socio-psicologica la familiarità di un percorso è un fattore essenziale nel processo di decisione. Questo perché si considera che fattori ignoti riferiti a percorsi ignoti possano aumentare la minaccia.

9.5.2 I gruppi

Secondo la letteratura socio-psicologica, una folla formata da piccoli gruppi, come le famiglie, tende ad agire insieme.

Le equazioni di Helbing permettono di trattare questo aspetto. Nel modello, le azioni di un gruppo sono divise, in due momenti:

1. nella fase di adunata i membri del gruppo camminano l'uno verso l'altro, ricompattandosi per stare insieme;
2. nella fase di uscita il gruppo si muove compatto verso l'uscita selezionata.

Nella fase di adunata i pedoni cercano di muoversi verso il centro del gruppo. Quando la distanza dal centro del gruppo di ogni pedone è sotto un valore di soglia, si considera che il gruppo sia completo. Quando un gruppo è completo, si avvia a muoversi verso un'uscita.

Questo equivale a dire che ogni membro del gruppo seguirà lo stesso campo di flusso. Inoltre, esso tenterà anche di restare unito al gruppo. Questo fenomeno può essere efficacemente modellato aggiungendo una forza supplementare al centro del gruppo, chiamata forza di gruppo. La magnitudo di questa forza descrive l'attitudine dei membri del gruppo a restare uniti.

A gruppi diversi possono corrispondere valori diversi di questa "attitudine alla coesione". Per esempio, il gruppo formato da una madre con il proprio figlio dovrebbe avere una forza più grande di quella che si immagina esistere tra un gruppo di colleghi di lavoro.

Tale tipo di approccio, pur essendo già stato implementato nelle routine di calcolo, non è disponibile nella versione attuale (FDS+EVAC 5.20), poiché i risultati non sono ancora stati sufficientemente analizzati.

9.6 ESEMPIO APPLICATIVO DEL CODICE FDS

Ogni comando FDS comincia con il parametro `&` e termina con il carattere `/`, e solitamente viene scritto, come tutti gli ipertesti, rispettando regole di tipo formale (indentazione) oltre che di tipo sintattico, indispensabili quando la complessità del file diventa elevata. E' infatti necessario che il file sia privo di errori sintattici affinché la simulazione proceda con successo.

```
fds_5.2.exe input.fds 2>> fds.err
```

Figura 9.4 - Contenuto del file “run.bat”.

Con i sistemi operativi Windows un modo semplice per lanciare una simulazione seriale (cioè su singolo processore) consiste nella creazione di un file batch (un semplice file di testo con estensione .bat), all’interno di una cartella nella quale siano contenuti anche l’eseguibile FDS ed il file di input FDS (Figura 9.5), e nella sua esecuzione con un semplice doppio click.

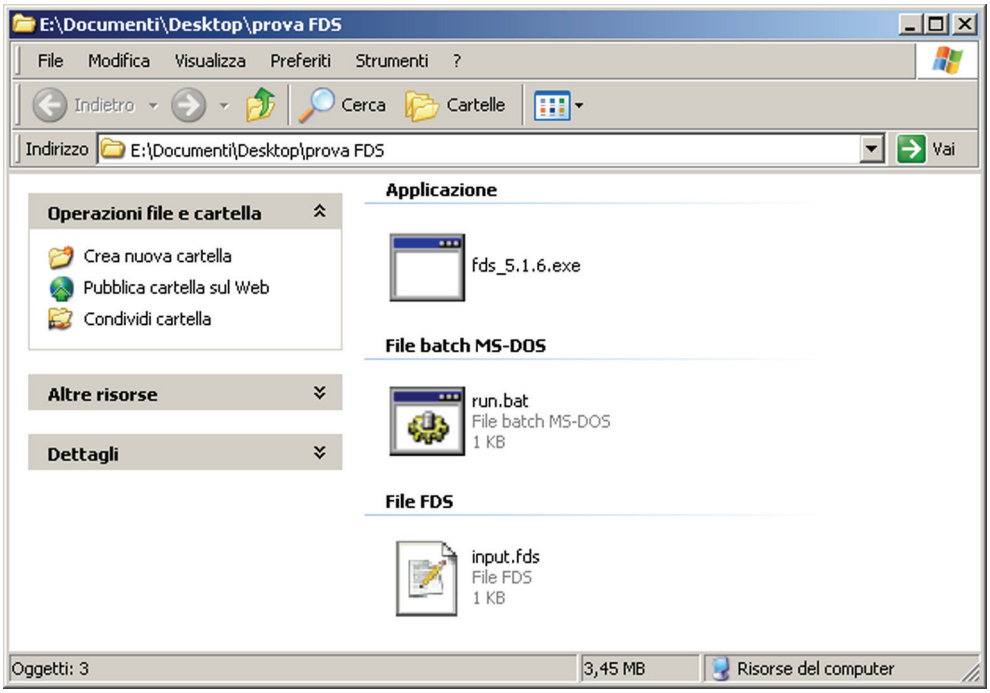

Figura 9.5 - File system di un sistema Windows.

Così facendo si possono riscontrare facilmente eventuali errori perché l’output d’esecuzione viene registrato sul file “fds.err” piuttosto che semplicemente a video per via della parte finale del comando (2>> fds.err).

```
&HEAD CHID='esempio', TITLE='esempio' /

&TIME T_END=100, /

&REAC ID='POLYURETHANE',
      C=6.30,
      H=7.10,
      O=2.10,
      N=1.00,
      SOOT_YIELD=0.10, /

&VENT MB='ZMIN', SURF_ID='OPEN', /

&MESH ID='fire_mesh',
      XB=0.00,100.00, 0.00,5.00, 8.00,8.00,
      IJK=400,20,32, /

&SURF ID='BURNER', HRRPUA=100, /

&OBST XB=9.00,11.00, 1.50,3.50, 0.00,0.50, /

&VENT XB=9.00,11.00, 1.50,3.50, 0.50,0.50,
      SURF_ID='BURNER', COLOR='RED', /

&SLCF PBY=2.50, QUANTITY='TEMPERATURE', /

&TAIL /
```

Figura 9.6 - Contenuto del file “input.fds” costruito per una simulazione d’esempio.

CAPITOLO 10

COSTRUZIONE E VALIDAZIONE DEL MODELLO

10.1 GENERALITÀ

Il primo passo da compiere quando si utilizza un software di simulazione è la corretta definizione del modello chiamato a rappresentare lo scenario oggetto di studio. Numerosissimi sono i parametri configurabili con i moderni software di simulazione e praticamente infinito è il livello di dettaglio teoricamente raggiungibile.

Tuttavia, i livelli di incertezza interni agli algoritmi di calcolo e le indeterminazioni sperimentali nella misura dei parametri fisici nonché gli elevati tempi di elaborazione dei modelli estremamente sofisticati, impongono di limitare la raffinatezza del calcolo a favore di risultati più coerenti in termini di precisione globale.

E' dunque necessaria una taratura del software di simulazione, attraverso un processo di manipolazione degli input, sia geometrici che fisici, verso un assetto finale che tenda a risultati attendibili.

Nei capitoli precedenti è stato valutato ed approfondito il quadro teorico cui può farsi riferimento nello studio di un generico evento d'incendio in galleria. In questo capitolo, con riferimento al software FDS+EVAC, si vuole applicare quanto visto alla costruzione di un modello che possa rappresentare adeguatamente e correttamente una dinamica d'incendio in galleria ferroviaria.

10.2 IL PROBLEMA DELLA GRIGLIA DI CALCOLO

Il parametro geometrico più importante di una simulazione FDS è la dimensione media della griglia di calcolo[13].

---

[13] Si parla di dimensione media perché è possibile, tra le varie opzioni FDS, definire una griglia di calcolo avente celle di dimensioni variabili, non solo in X, Y e Z, ma anche lungo l'estensione del campo. Questo potrebbe essere un fatto estremamente positivo laddove una maggiore rilevanza di fenomeni avviene in una data zona. Si avrebbe così la possibilità di ottenere una griglia molto fitta nelle

Al diminuire delle dimensioni di cella corrispondono precisioni diverse degli output, maggiori tempi di calcolo e maggiore flessibilità geometrica, ovvero maggiore capacità di modellazione geometrica dello spazio tridimensionale.

Se è ovvio che al diminuire delle dimensioni della griglia aumentano notevolmente la flessibilità geometrica ed i tempi di calcolo, non è altrettanto ovvio che nella stessa direzione vada la precisione degli output. In altre parole, non è detto che a modelli più fitti corrispondono elaborazioni più precise.

E' bene ricordare, infatti, che sono due le modalità di calcolo in FDS:

- l'approccio DNS (Direct Numerical Simulation), che esegue algoritmi a scala microscopica come funzioni dirette dei parametri cinetici delle reazioni chimiche definite;
- l'approccio LES (Large Eddie Simulation), dove le reazioni chimiche non vengono modellate a scala molecolare ed il rilascio del calore viene computato attraverso "elementi termici", trattati come particelle Lagrangiane che liberano ciascuna una quota parte del calore totale.

L'approccio LES, che è l'unico approccio praticamente utilizzabile nello studio di fenomeni di grandi dimensioni quali l'incendio di un edificio o di una galleria, è quindi composto da algoritmi che lavorano su "valori medi" a scala macroscopica. Questa impostazione fa sì che esista una dimensione di griglia ottimale, al di sotto della quale si tende a precisioni inferiori piuttosto che maggiori, o comunque al di sotto della quale l'aumento esponenziale dei tempi di calcolo non corrisponde ad una garanzia di maggiore precisione.

Quindi è sempre d'obbligo trarre delle considerazioni preliminari sulla dimensione della griglia di calcolo e sui relativi tempi di elaborazione, al fine di potere scegliere la dimensione ottimale per la suddivisione del dominio, verificando in primo luogo che il valore scelto come riferimento sia sufficientemente attendibile in termini di precisione e contemporaneamente compatibile con i tempi di sviluppo del progetto stesso.

---

zone di maggiore rilievo, compensando gli elevati tempi di elaborazione con una griglia meno fitta nella restante parte del campo. Negli sviluppi di questa tesi, tuttavia, sono state definite esclusivamente celle cubiche di dimensioni costanti lungo il dominio.

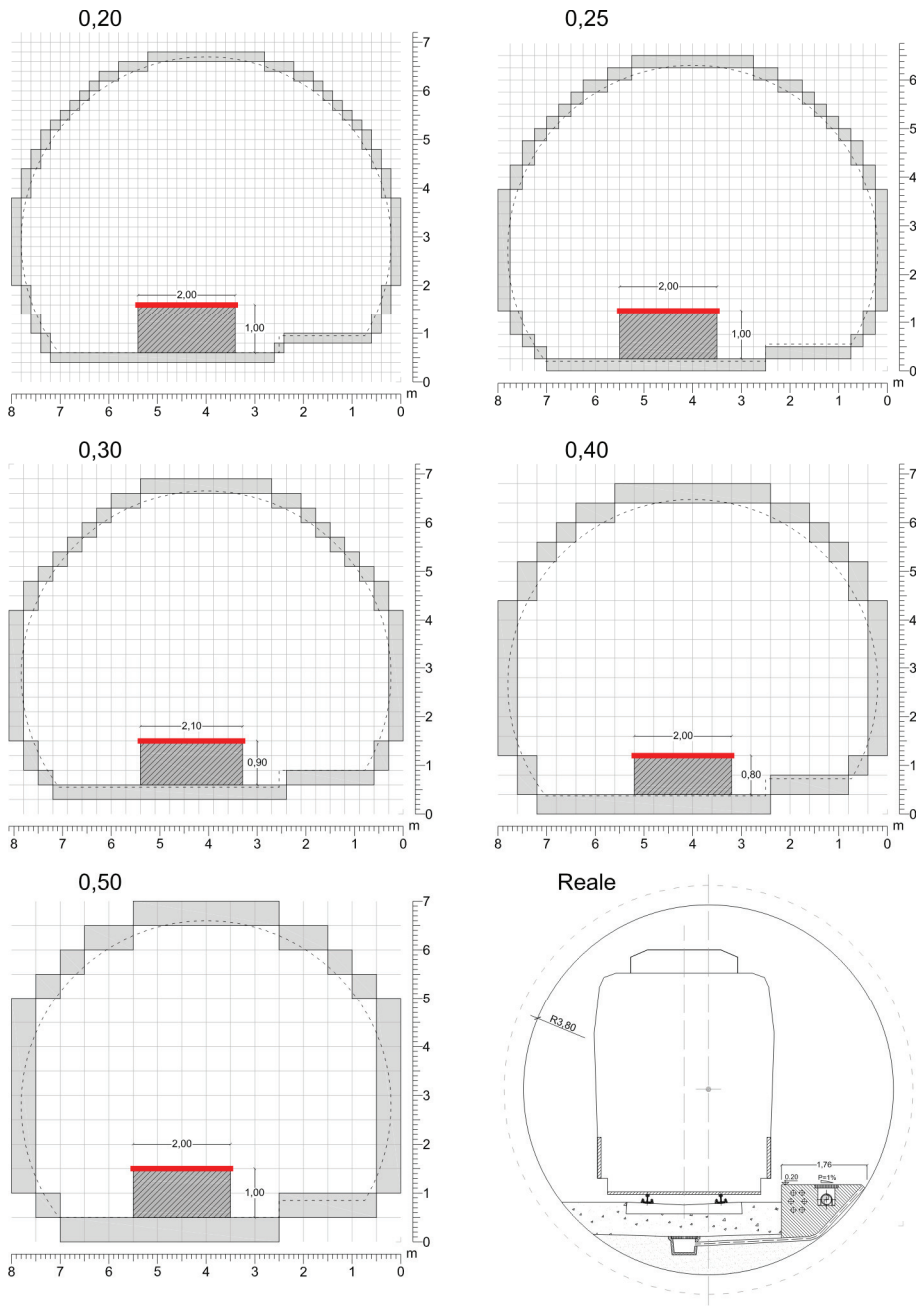

Figura 10.1 - Sezione effettiva e discretizzazione di una sezione al variare delle dimensioni della griglia.

10.2.1 Criteri generali

In generale è opportuno costruire i modelli usando celle relativamente grandi e gradualmente rifinire il livello di dettaglio finché non si misurano apprezzabili differenze nei risultati.

Nel caso di simulazioni che studiano l'evoluzione delle fiamme e dei prodotti della combustione di un incendio, una misura di quanto bene può essere risolto il campo di flusso può ricercarsi nell'espressione adimensionale che fornisce l'indice di precisione:

$$\text{indice di precisione} = D^*/\delta x \tag{10.1}$$

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_a \cdot c_p \cdot T_a \cdot g^{1/2}} \right)^{2/5} \tag{10.2}$$

dove **D*** è il diametro caratteristico del fuoco, $\mathbf{T_a}$ [K] è la temperatura ambiente, **Q** è l'HRR totale del fuoco [kW], **g** [9,806 m/s] è l'accelerazione di gravità, $\mathbf{c_p}$ [1,009 $kJ \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$] è il calore specifico a pressione costante dell'aria, $\boldsymbol{\rho_a}$ è la densità dell'aria a 20°C [1,225 Kg/m^3] e δx è la dimensione nominale di una cella.

La quantità $D^*/\delta x$ può intendersi come il numero di celle di calcolo che interessa il diametro caratteristico (non quello fisico) del fuoco. Maggiore è il numero di celle che interessa lo spazio caratteristico del fuoco, migliore sarà la risoluzione del calcolo.

E' dunque opportuno valutare in prima approssimazione la qualità della suddivisione del dominio in termini di questo parametro adimensionale, piuttosto che in assoluto.

10.2.2 Ottimizzazione matematica della griglia

Poiché un'importante parte del calcolo FDS usa, nelle direzioni Y e Z, un risolutore di Poisson basato sulle Trasformate Veloci di Fourier (FFTs - Fast Fourier Transforms), la seconda e la terza dimensione della maglia dovrebbero essere della forma:

$$2^l \cdot 3^m \cdot 5^n$$

dove l, m e n sono numeri interi. Per esempio, $64 = 2^6$, $72 = 2^3 \cdot 3^2$ e $108 = 2^2 \cdot 3^2 \cdot 5$ sono

buone divisioni di maglia, ma 37, 99 e 109 non lo sono.

Il numero di celle lungo la prima dimensione, lungo l'asse X, non usa le FFTs e non ha bisogno di essere dato come un prodotto di piccoli numeri.

Al fine di ottimizzare i tempi di calcolo è dunque di primaria importanza avere un numero di celle nel piano YZ multiplo di 2, 3 e 5.

10.3 L'ESPERIENZA DEL RUNEHAMAR TUNNEL COME RIFERIMENTO

Nel corso del lavoro preliminare alla stesura di questa tesi, più volte si è posto il problema di individuare, per ogni data simulazione d'incendio, un adeguato riferimento cui poter relazionare gli output al fine di trarre considerazioni sulla precisione e sulla eventuale validità dei risultati ottenibili dalla simulazione stessa.

In particolare, ci si è concentrati sull'aspetto specifico dei fuochi interni ai tunnel, ponendo l'attenzione sui casi reali d'incendio e sulle informazioni da essi ricavabili, con particolare riferimento ai test prodotti nel Runehamar tunnel in Norvegia nel 2003.

Questo ha permesso di confrontare i valori proposti dalle relazioni empiriche con i valori misurati negli esperimenti a scala reale del Runehamar Tunnel, giungendo alla conclusione che le formule empiriche studiate in questa sede non possono essere considerate in generale, ma devono essere riferite solo a classi di problemi equivalenti per HRR e per caratteristiche al contorno.

Infatti, un caso d'incendio in galleria presenta in genere valori di HRR notevolmente più elevati di quelli riprodotti nel corso degli esperimenti che hanno permesso di derivare le relazioni empiriche studiate al capitolo 3.

In Figura 10.2 sono riportati i risultati forniti dalle relazioni empiriche relativamente ad un ipotetico caso di incendio in galleria avente le seguenti caratteristiche (per i valori delle altre grandezze può farsi riferimento ai capitoli 2 e 3):

- sezione rettangolare larga 9,00 m e alta 6,00 m;
- pool fire di quadrato di 4,00 m^2 posto centralmente alla sezione a quota zero;
- HRR pari a 10MW;
- vento longitudinale di 3 m/s.

Osservando la Figura 10.2 appare evidente l'elevata dispersione dei valori di temperatura forniti dalle varie correlazioni nella zona centrale del fuoco, nonché l'elevata differenza tra i valori di Kurioka (~200 °C) ed i valori delle altre correlazioni (400÷650 °C), attribuibile fondamentalmente all'incidenza della ventilazione longitudinale sullo sviluppo dei fumi: le due formule di Kurioka, essendo infatti le uniche a considerare come parametro il valore della velocità di ventilazione longitudinale, forniscono valori di temperatura decisamente inferiori a quelli delle altre correlazioni ed appaiono così come le uniche a cui fare riferimento in quelle situazioni in cui la presenza della ventilazione è sostanziale.

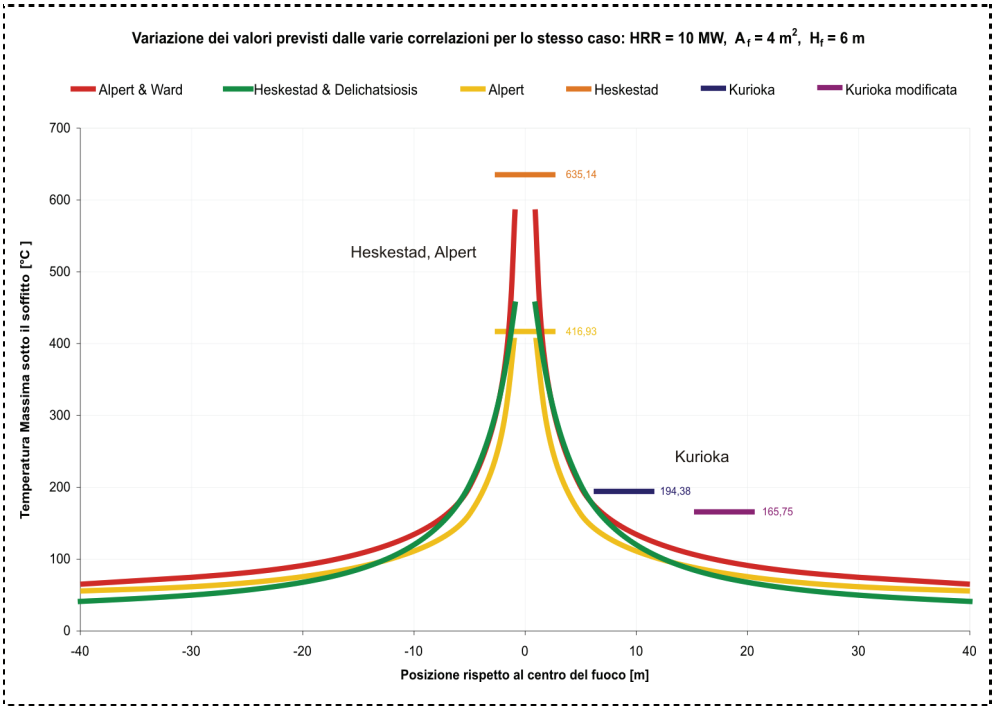

Figura 10.2 - Variazione dei valori previsti dalle correlazioni empiriche nello studio dello stesso caso.

Inoltre le due formule di Kurioka forniscono anche la posizione della fiamma, cioè l'offset tra il centro del fuoco e la zona di fiamma a più alta temperatura, poiché la fiamma è sicuramente piegata per effetto del vento (paragrafo 3.5.1).

Tuttavia le due formule di Kurioka non sono state sviluppate in funzione di grandi HRR, al punto che la prima delle due (quella che non tiene in conto la forma del pool fire) ammette

come limite superiore un valore pari a circa 768 °C, mentre è ampiamente riconosciuto che in galleria sono possibili valori notevolmente più elevati.

In virtù di quanto affermato è dunque apparso opportuno abbandonare il primo approccio di validazione, fondato cioè sulla verifica degli output FDS attraverso il confronto con i valori proposti dalle relazioni empiriche, mentre è invece apparso corretto costruire gli input del modello FDS con riferimento ai test del 2003 condotti in Norvegia nel Runehamar Tunnel, per i quali sono disponibili numerosi e dettagliati set di misurazioni (Figura 10.4 - Tabella 10.1 - Figura 10.5).

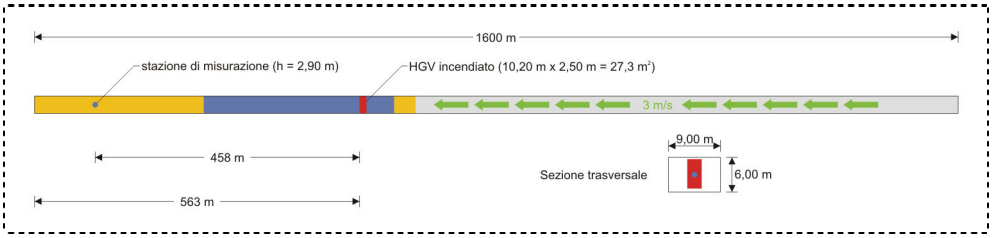

Figura 10.3 - Schema geometrico del test Runehamar T2. Gli sfondi giallo e azzurro indicano i due tratti presi in considerazione nelle simulazioni discusse in questo capitolo.

Si è pensato, cioè, di ricostruire parte dell'esperienza norvegese del Runehamar Tunnel realizzando il set-up di una simulazione FDS di riferimento a partire dalle condizioni fisiche e geometriche di quei test. Il percorso seguito per la definizione dei valori di input del modello deterministico di riferimento è stato quello di studiare la variazione degli output FDS di un modello base al variare di alcuni parametri considerati input di prioritaria importanza, quali:

- la dimensione della griglia di calcolo,
- la dimensione del pool fire, ovvero il valore del parametro HRRPUA (Heat Release Rate per Unit area),
- il valore del tasso di produzione di CO per la reazione di combustione scelta (poliuretano).

Al variare di ognuno di questi aspetti sono state eseguite diverse simulazioni e sono stati eseguiti dei grafici riepilogativi dell'effetto di tali variazioni sulla temperatura massima nella zona del fuoco (controllo locale) e sui valori del FED di un ipotetico individuo immobile posto a circa 450 m dal fuoco (controllo a distanza).

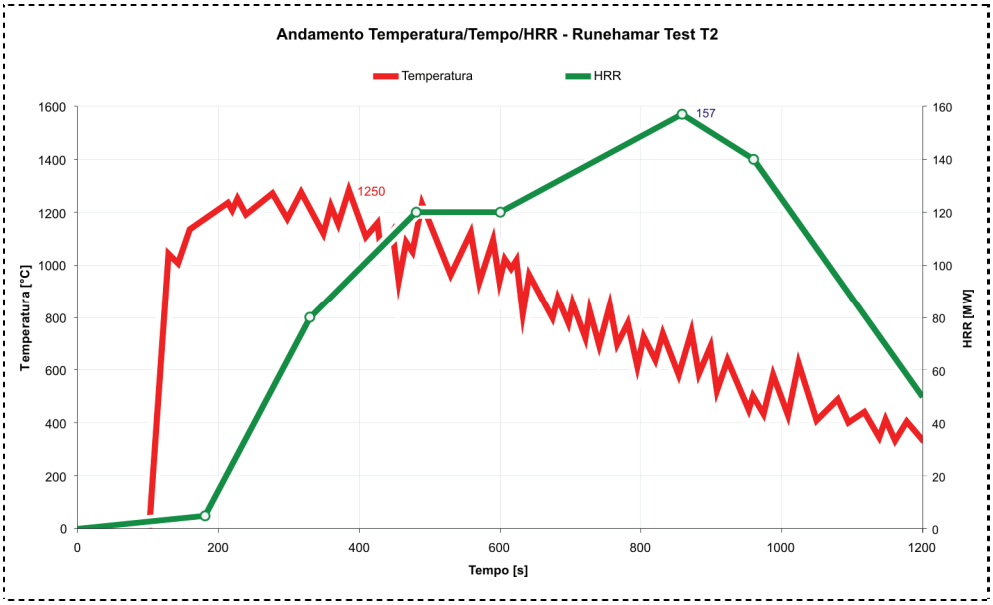

Figura 10.4 - Andamento reale dei picchi di temperatura nella zona del fuoco e riproduzione lineare a tratti dell'andamento del'HRR per il test Runehamar T2, nei primi 20 minuti.

In parallelo a queste simulazioni ne sono state effettuate delle altre che hanno permesso di osservare l'interpretazione che esegue il software dell'interazione tra il flusso d'aria longitudinale ed i prodotti della combustione, al variare della velocità di tale flusso ovvero al variare della velocità di ventilazione longitudinale.

Runehamar Test T2	
CO max	2430 ppm
CO_2 max	9,20 %
HCN max	218 ppm
O_2 min	8,6 %
T max	97 °C

Tabella 10.1 - Valori di picco per CO, CO_2, HCN, e T e valori minimi per O_2 nel Runehamar Test T2. Tutti i valori corrispondono ad una quota di 2,90 m a 458 m dal centro del fuoco.

In altre parole sono state effettuate sia simulazioni di studio parametrico, per quei parametri che non hanno trovato in letteratura sufficiente approfondimento, che simulazioni

di semplice osservazione del comportamento dei software FDS ed EVAC.

Tra i quattro test del Runehamar Tunnel si è dato particolare rilievo al test T2 poiché nel set-up dell'incendio di questa precisa esperienza, oltre a 220 pallets di legno, furono incendiati 240 materassi di poliuretano (PUR) la cui reazione di combustione è proprio la reazione che si è voluta scegliere per configurare il meccanismo di combustione nelle simulazioni conclusive di questa tesi.

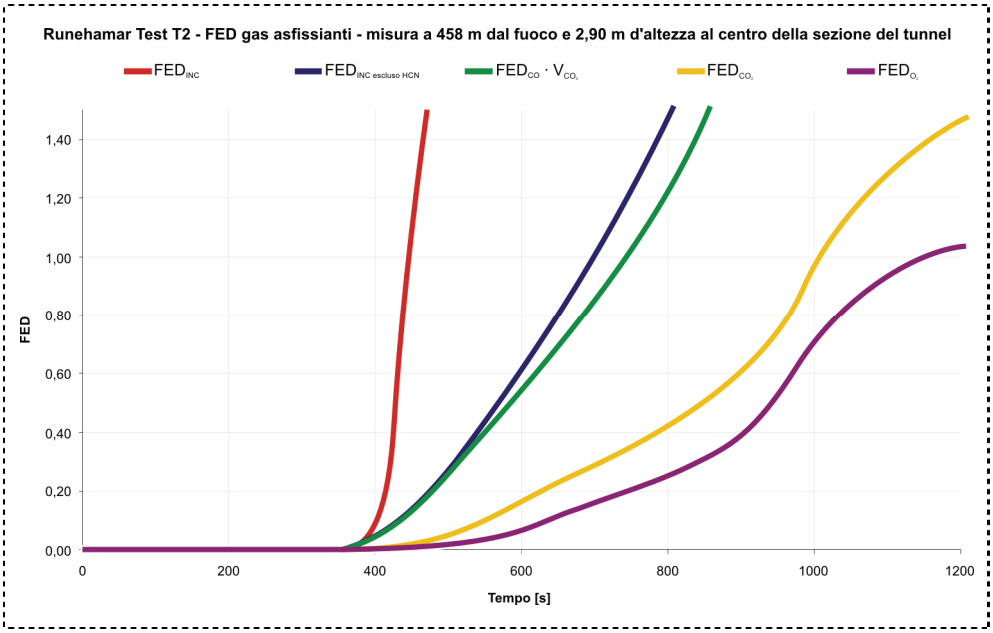

Figura 10.5 - Valori del FED nell'esperienza del test Runehamar T2.

10.3.1 Studio per la definizione della griglia di calcolo

Una volta noti gli aspetti principali, al fine di perseguire l'obiettivo di ottenere una griglia di calcolo capace di un soddisfacente rapporto (precisione) / (tempi di elaborazione), sono state sviluppate cinque **simulazioni elementari** riproducendo per un tratto di 330 m (tratto azzurro Figura 10.3), le condizioni del test Runehamar T2 (vedi Tabella 10.2).

Le cinque simulazioni sono state costruite su griglie cubiche di dimensioni variabili nei cinque casi da 0,20 m a 0,50 m, secondo la progressione 0,20 - 0,25 - 0,30 - 0,40 - 0,50.

Il criterio di validazione è stato quello di studiare l'influenza della risoluzione della griglia di calcolo sulla temperatura massima, misurandone i valori nella zona del fuoco, con un sistema di termocoppie virtuali sistemate centralmente alla galleria, lungo una linea longitudinale posta pochi centimetri sotto il soffitto.

L'inviluppo delle temperature misurate dalle termocoppie, cioè l'insieme dei valori misurati da FDS nei punti di monitoraggio, è stato confrontato nei cinque casi per comprendere in primo luogo gli effetti della sola variazione della griglia e secondariamente l'aderenza maggiore o minore di ognuno dei cinque casi al valore reale di confronto, che si è individuato in 1250°C (vedi Figura 10.4).

set-up RUNEHAMAR TEST T2 - studio griglia	
HRR	157 MW
riproduzione crescita HRR	lineare a tratti (Figura 10.4)
ventilazione longitudinale EST - OVEST	3 m/s
parametri della combustione stechiometrica	poliuretano
estensione longitudinale dominio	330,00 m
altezza dominio	6,00 m
larghezza dominio	9,00 m
mesh di suddivisione del dominio FDS longitudinale	11 di 6,00 x 9,00 x 30,00 m^3
sezione galleria	rettangolare
condizioni al contorno del tunnel	nessuna dispersione di calore
set-up fuoco	pool fire 3,00 x 9,00
tempo di simulazione	1200 s

Tabella 10.2 - Set-up simulazioni FDS per la definizione della griglia di calcolo.

Osservando la Figura 10.6 si può notare come in tutti i casi la temperatura riprodotta da FDS non superi i 1100 °C, mentre la temperatura di picco misurata nel test Runehamar T2 è di circa 1250 °C; dunque in nessuno dei 5 casi si ha convergenza con il valore preso a riferimento. Tuttavia è d'obbligo ricordare che il test Runehamar T2 è stato costruito simulando l'incendio di un HGV e dunque interessando quasi tutta l'altezza del tunnel[14],

[14] Il set-up del carico d'incendio, nel test Runehamar T2, è stato effettuato ponendo (220 pallets di legno e 240 materassi di poliuretano) sopra un semi-rimorchio misurante 10,45 m per 2,90 m. L'altezza

mentre nel caso delle cinque simulazioni riprodotte ad esso è stato approssimato un pool fire da poliuretano posto alla quota della superficie inferiore del dominio.

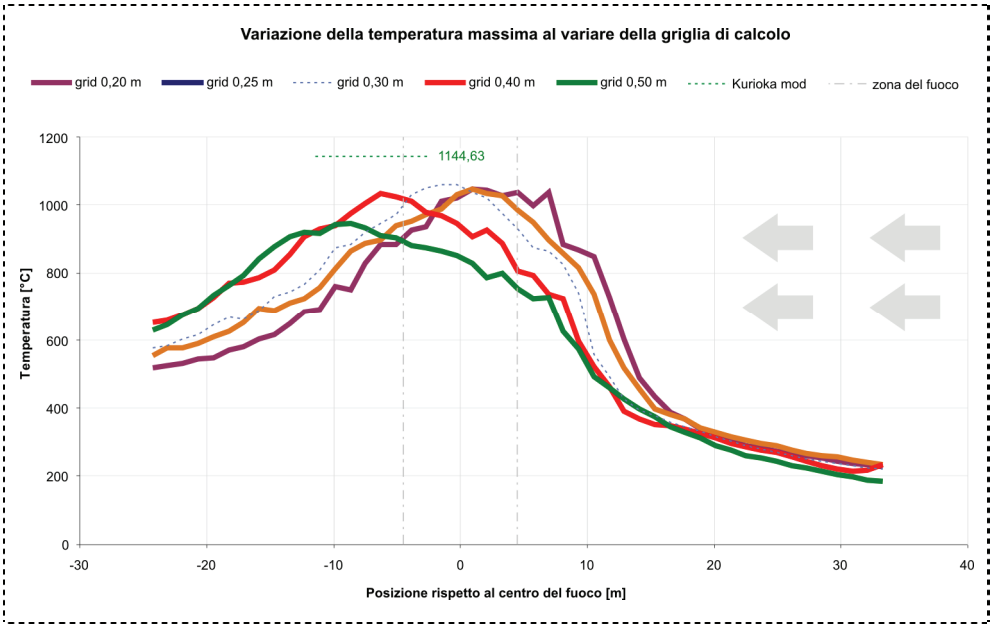

Figura 10.6 - Andamento delle temperature per le 5 simulazioni di validazione della griglia.

E' bene evidenziare, in particolare, che la sezione reale del Runehamar Tunnel non è regolare (Figura 10.7); la sua larghezza varia infatti tra 8,17 m e 9,40 m con un minimo di altezza di 6,39 m nella regione identificata per l'incendio. Inoltre, per un tratto di 75 m lungo il soffitto e di 25 m lungo le pareti laterali nella zona del fuoco, il tunnel è stato rivestito con dei pannelli isolanti fissati ad una leggera struttura metallica, a formare una sezione regolare anche se non esattamente rettangolare. In particolare nei 75 m della zona del fuoco, l'altezza della sezione libera è stata ridotta a circa 4,50 m contro i 6,00 m del modello.

Si sarebbe potuto scegliere di modellare in maniera più precisa il tunnel, ma ciò avrebbe portato a variazioni geometriche del dominio nei 5 casi riducendo l'impatto della sola variazione della griglia sul campo di flusso e dunque sulle considerazioni di questa fase.

---

totale del carico era 4,5 m con l'altezza della piattaforma inferiore posta a 1,10 m (Figura 10.7).

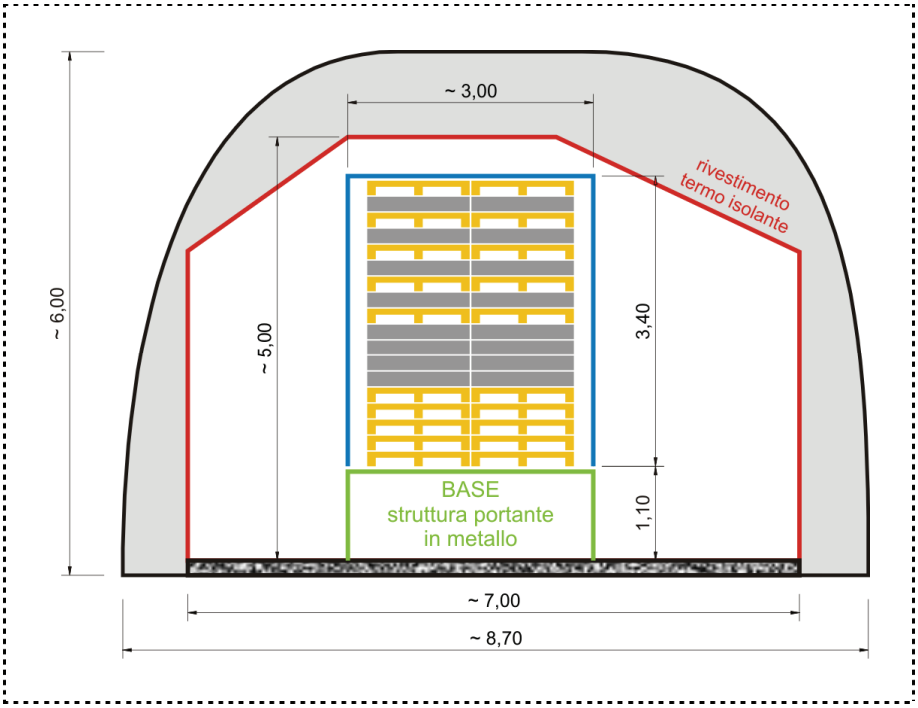

Figura 10.7 - Sezione trasversale set-up Runehamar test T2.

Quindi, in questa fase di validazione, si ritiene che uno schema di 6,00 x 9,00 rettangolare sia adeguato a trarre le dovute considerazioni, offrendo il particolare vantaggio di non far variare la dimensione del dominio in senso verticale (il numero 6 è contemporaneamente multiplo di 0,20 - 0,25 - 0,30 - 0,40 - 0,50) e di far variare a 8,80 m la sezione trasversale nel solo caso di griglia pari a 0,40 m.

n°	griglia [m]	dimensioni [m]			numero celle				ottimizzazione	celle totali	t [ore]
		X	Y	Z	X	Y	Z	YZ	FDS - FFT	XYZ	
1	0,20	330	9,00	3,00	1650	45	30	1350	$2^1 \cdot 3^3 \cdot 5^2$	24.502.500	44,33
2	0,25	330	9,00	3,00	1320	36	24	864	$2^5 \cdot 3^3 \cdot 5^0$	12.545.280	16,01
3	0,30	330	9,00	3,00	1100	30	20	600	$2^3 \cdot 3^1 \cdot 5^2$	7.260.000	n.d.
4	0,40	330	8,80	6,00	825	22	15	330	no	2.994.750	n.d.
5	0,50	330	9,00	3,00	660	18	12	216	$2^3 \cdot 3^3 \cdot 5^0$	1.568.160	n.d.

Tabella 10.3 - Riepilogo dati dello studio sulla griglia di calcolo.

Sempre osservando la Figura 10.6 si nota come non sia possibile trarre delle considerazioni radicali sulla maggiore o minore qualità di una particolare suddivisione, visti anche gli elevati valori del rapporto D*/δx in tutti e cinque i casi (Tabella 10.4).

Ciò che invece può affermarsi con certezza è che il caso 3 (griglia pari a 0,30 m), oltre a fornire il valore di temperatura più alto, seppur di pochi °C, manifesta un comportamento intermedio agli altri 4 casi, con tempi di calcolo decisamente ragionevoli.

Si ritiene pertanto che il caso 3 (griglia 0,30 x 0,30 x 0,30 m^3) sia il caso più adatto a fornire le basi per le simulazioni successive, attribuendo ad esso il miglior rapporto (precisione) / (tempi di elaborazione).

Il caso 4, griglia 0,40 m, potrebbe essere considerato per valutazioni di massima, discostandosi non molto dal caso 3.

n°	griglia [m]	D*/δx	Area pool fire [m^2]	HRRPUA [KW/m^2]	T_{max} [K]	ΔT [K]	ΔT [%]
1	0,20	35,92	3,00 x 9,00 = 27,00	5814,81	1048	202	16%
2	0,25	28,74	3,00 x 9,00 = 27,00	5814,81	1046	204	16%
3	0,30	23,92	3,00 x 9,00 = 27,00	5814,81	1061	189	15%
4	0,40	17,96	3,20 x 8,40 = 26,88	5575,28	1032	218	17%
5	0,50	14,37	3,00 x 9,00 = 27,00	5814,81	944	306	24%

Tabella 10.4 - Confronto tra i valori della Temperatura nei cinque casi rispetto al valore di picco T_{max} = 1250 °C misurato nel test Runehamar T2.

Ancora osservando la Figura 10.6 si può notare come la formula di Kurioka modificata fornisca per 157 MW, H_f = 6,00 m, A_f = 27,30 m^2, D_2 = 2,50 m il valore T_{max} = 1144,63 °C adeguato a rappresentare il caso studiato.

10.3.2 Studio sul parametro HRRPUA

Nell'impostazione delle simulazioni FDS di questa tesi, l'informazione fondamentale è sempre quella dell'HRR. Ad ogni simulazione è sempre associato un valore di HRR rappresentativo del carico d'incendio per quel particolare scenario, e le considerazioni che ne derivano sono relative all'osservazione dei soli prodotti della combustione ed alla loro interazione con l'ambiente simulato.

Tuttavia, questa non è l'unica modalità possibile, poiché potrebbe ad esempio non fornirsi un valore predefinito di HRR ma effettuarne invece il calcolo.

In tal caso sarebbe necessario costruire opportunamente lo spazio numerico della simulazione, attribuendo ad ogni superficie proprie capacità termiche e modellizzando l'innesco di una particolare regione dello spazio[15].

Un approccio di questo tipo sarebbe ad esempio opportuno qualora si volessero trarre considerazioni sul carico d'incendio potenziale ad un determinato convoglio, partendo dalle proprietà termiche dei materiali che compongono il convoglio stesso, da un certo tipo d'innesco e da determinate condizioni di esposizione ambientale[16].

Nella simulazioni FDS di questa tesi, come accennato all'inizio del paragrafo, l'HRR è sempre da considerarsi come un input e dunque sarà sempre fissato il suo valore di picco così come il suo sviluppo nel tempo. Tuttavia tale precisazione non è sufficiente a renderne univoca la definizione poiché restano ancora diverse le modalità che possono complessivamente fornire lo stesso valore di HRR per una data simulazione.

Fissata la dimensione della griglia di calcolo a 0,30 m, secondo il procedimento del paragrafo 10.3.1, e scelto un determinato valore di HRR definendo anche la sua legge di

---

[15] L'algoritmo FDS include, a tal proposito, un modello semplice per l'innesco e la propagazione delle fiamme sulle superfici, attivabile semplicemente assegnando ad ogni superficie combustibile una propria temperatura d'innesco.

All'interno di questo tipo di approccio, il processo di pirolisi viene così governato da una costante prescritta dall'utente, immessa sotto forma di un tasso di rilascio di calore per unità di superficie (HRRPUA) o, alternativamente, come un calore di vaporizzazione (HEAT_OF_VAPORIZATION).

Se viene prescritto un valore di HRRPUA (Heat Release Rate Per Unit Area) la superficie considerata, una volta raggiunta la temperatura di innesco, brucerà come un vero e proprio bruciatore. Se invece viene prescritto un calore di vaporizzazione, il tasso di combustione dipenderà dall'apporto complessivo di calore del sistema alla superficie stessa.

In entrambi i casi la funzione HRR, ovvero la quantità di calore rilasciato nell'unità di tempo dall'intero sistema, sarà un prodotto dell'input e non, al contrario, un input stesso.

[16] Esistono studi neozelandesi nei quali sono stati usati sia l'approccio HRRPUA che l'approccio HEAT_OF_VAPORIZATION, per valutare il carico di incendio di particolari convogli in uso su alcune metropolitane [70].

sviluppo nel tempo, è conseguentemente necessario approntare ulteriori ipotesi sulla sua distribuzione spaziale.

Se infatti il valore di HRR indica, istante per istante, la quantità di energia rilasciata nell'ambiente galleria per effetto della combustione, esso preso così com'è nulla dice su come tale energia è distribuita nello spazio.

In riferimento agli scenari trattati nella letteratura specialistica della prevenzione incendi, inseriti nel contesto teorico di un incendio in galleria ferroviaria, tre sono le modellazioni spaziali del fuoco cui si può fare riferimento:

- **Jet Fire** - letteralmente "dardo di fuoco". L'origine di energia può schematizzarsi come derivante dall'innesco di un getto di liquido o di gas rilasciato da un contenitore in pressione e da una fonte sostanzialmente puntuale.
- **Pool Fire** - letteralmente "pozza incendiata". L'origine di energia è in questo caso derivante dall'innesco di una sostanza liquida sversata in un area più o meno circoscritta. Tale evento produce, di norma, la formazione di un incendio per l'intera estensione della "pozza".
- **Car Fire** - letteralmente "vagone incendiato". L'origine di energia deriva dall'incendio di un oggetto tridimensionale, come l'incendio completo di un vagone ferroviario, di un'automobile o di una cabina elettrica.

Ognuno di questi tre scenari è sia praticamente che teoricamente ipotizzabile in galleria ed in particolare se l'evento incidentale origina dal deragliamento di un treno merci, come accaduto, ad esempio, il 18 Luglio 2001 nell'Howard Street Tunnel a Baltimora, nel Maryland USA [58].

Tuttavia, nel caso di incendio su un treno passeggeri in transito all'interno di una galleria a singola canna, che è lo scenario teorico di base, l'ipotesi di un jet fire è concettualmente sbagliata mancando la possibilità di un getto in pressione ipotizzabile nel caso di deragliamento di un treno merci, ed anche quella di un pool fire se limitiamo per ipotesi il campo di incendio alle sole carrozze passeggeri.

In questa sede però, non si vuole studiare una riproduzione scenografica dell'evento, ma si vuole individuare quale tra le modellazioni possibili, a parità di HRR e di risoluzione di calcolo, fornisce gli output più attendibili nel confronto con il test Runehamar T2 e quanto, eventualmente, un'ipotesi si allontana da un'altra.

A partire cioè dalla schematizzazione dell'esperimento del test Runehamar T2 (Tabella 10.2), riprodotto a griglia cubica di 0,30 m, è stata effettuata una serie di simulazioni su un tratto di 660 m (tratto giallo Figura 10.3) valutando la variazione di temperatura massima nella zona del fuoco in funzione della variazione dell'area del pool fire e dunque del parametro HRRPUA.

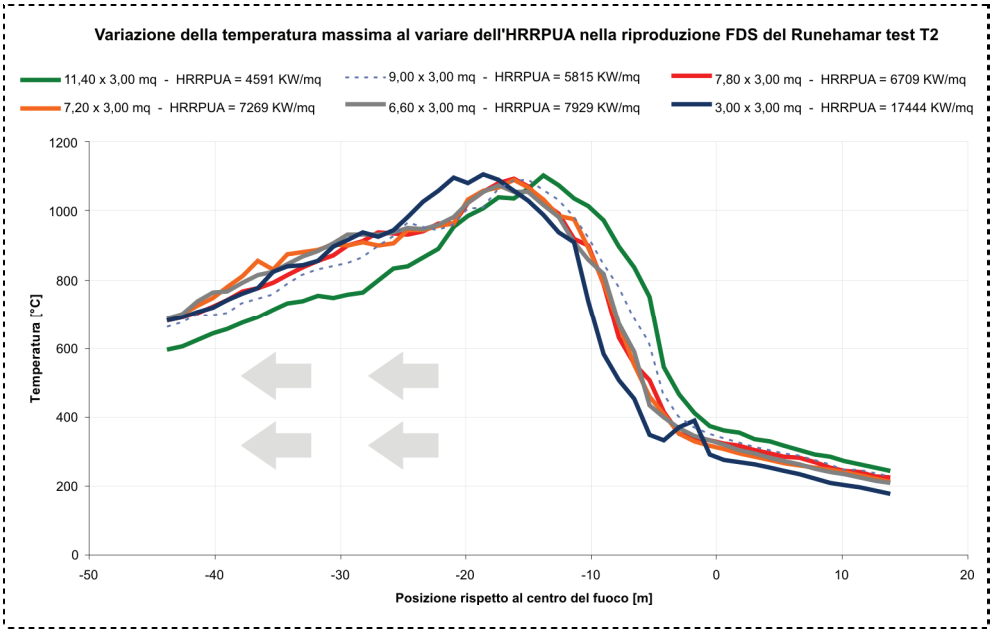

Figura 10.8 - Variazione delle temperature massime in funzione della variazione dell'area del pool fire. Sono state riportate solo le distribuzioni più significative.

Si è scelto inoltre di modellare il fuoco esclusivamente come un pool fire da poliuretano, posto alla quota di 30 cm dal piano inferiore del tunnel.

E' bene ricordare che il set-up effettivo del fuoco, nel test T2, è stato effettuato simulando l'incendio di un semi-rimorchio carico di pallets e materassi di poliuretano (Figura 10.7), accatastati sopra un pianale di circa 27 m^2 posto ad una quota di circa 1,10 m dal piano inferiore della galleria. L'estensione trasversale del semirimorchio era di circa 3 m e la sua altezza complessiva di circa 4,50 m.

Nel grafico della Figura 10.8 sono stati riportati gli andamenti della temperatura massima al variare della dimensione del pool fire. Si può notare come non esista una netta differenza

tra i vari casi pur con elevate variazioni del parametro HRRPUA. Si deve notare inoltre come il campo di variazione scelto non abbia influenza sulla temperatura massima e come sembra esistere una certa convergenza di valori nelle zone distanti dal fuoco.

Osservando invece la Figura 10.5, si può notare come i due valori estremi di HRRPUA forniscano quasi lo stesso andamento della FED nel tempo, mentre i valori intermedi tendano quasi ad un sorta di minimo (la curva della FED prima scende e poi risale). Ciò che invece appare importante è la corretta interpretazione della Fractional Effective Dose da parte di FDS, come cioè le diverse curve simulate abbiano lo stesso andamento delle curve reali di Figura 10.5 e come, in ogni caso, le differenze tra i vari casi siano contenute.

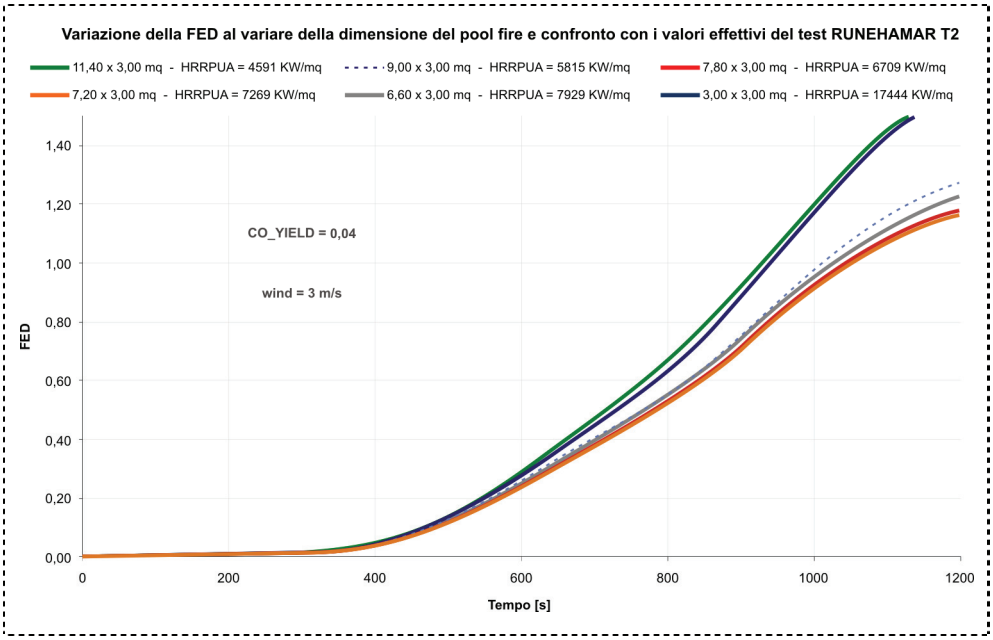

Figura 10.9 - Variazione della FED al variare della dimensione del pool fire.

Alla luce di quanto osservato appare difficile individuare una precisa simulazione come maggiormente aderente alla realtà dei test del Runehamar.

Ciò è sicuramente imputabile alla grossolana riproduzione che se ne è fatta, ma probabilmente anche ad una effettiva non influenza del valore della dimensione del pool fire nel campo studiato.

In conseguenza di ciò e soprattutto in conseguenza del fatto che il valore della FED tende ad una sorta di minimo in corrispondenza dei valori di HRRPUA intermedi al range studiato, anche in virtù di ulteriori studi parametrici non riportati in questa sede, si ritiene opportuno considerare come dimensione di riferimento per la modellazione del pool fire quella di 3,00 x 9,00 = 27 m^2. Tale fatto trova ulteriore riscontro nell'essere la superficie scelta uguale alla proiezione orizzontale del car fire effettivo del test del Runehamar.

Si ritiene inoltre che un pool fire di 27 m^2 sia idoneo a rappresentare anche casi di diverso HRR complessivo. Pertanto nel seguito di questo lavoro il modello deterministico di riferimento, relativamente alla solo modellazione del fuoco, sarà costituito da un pool fire da poliuretano di 3,00 x 9,00 m^2, indipendentemente dalla taglia del fuoco considerato.

10.3.3 Studio sul parametro CO_YIELD

Si è già visto come il software FDS necessiti della configurazione di una reazione di combustione. Ad ogni materiale può essere associata una particolare reazione di combustione ma il processo è sempre governato in base alla reazione di combustione principale.

Ogni reazione è modellabile secondo diversi parametri. Esistono parametri che sono esclusivi di certe modalità di calcolo, altri che sono invece del tutto generali.

La reazione di combustione predefinita in FDS è quella del propano. Nel nostro caso si è voluto invece che i parametri stechiometrici della combustione siano quelli del poliuretano.

Definire correttamente i parametri stechiometrici delle reazioni chimiche FDS, qualora non si riescano a trovare in letteratura sufficienti e valide informazioni, non è un'operazione banale in conseguenza anche del fatto che alcuni meccanismi di calcolo agiscono in funzione diretta di questi input.

E' questo il caso della FED che viene valutata come diretta conseguenza dei parametri stechiometrici CO_YIELD e SOOT_YIELD che rappresentano il tasso di produzione di CO e di fumo per unità di massa combustibile.

Nella fattispecie, mentre il secondo di questi due parametri influisce solo sulla velocità di movimento degli individui esposti, il fattore CO_YIELD definisce la quantità di CO presente nell'ambiente e dunque si configura come il principale agente incrementale della FED.

Si ricorda che FDS non considera l'HCN anche quando questi risulta correttamente

definito come specie extra tra i parametri della reazione, ma considera esclusivamente il monossido di carbonio e l'effetto iperventilante dell'anidride carbonica e della carenza di ossigeno, i cui effetti sono però tenuti in considerazione sempre e solo in funzione del tasso CO_YIELD. In altre parole, se il valore di questo parametro è pari a zero anche la FED di ogni individuo sarà pari a zero.

Dunque l'esposizione ai gas tossici, relativamente all'attuale stato di sviluppo di FDS, è una funzione diretta dell'input dell'utente e ciò, in assenza di validazione, può essere un grosso limite.

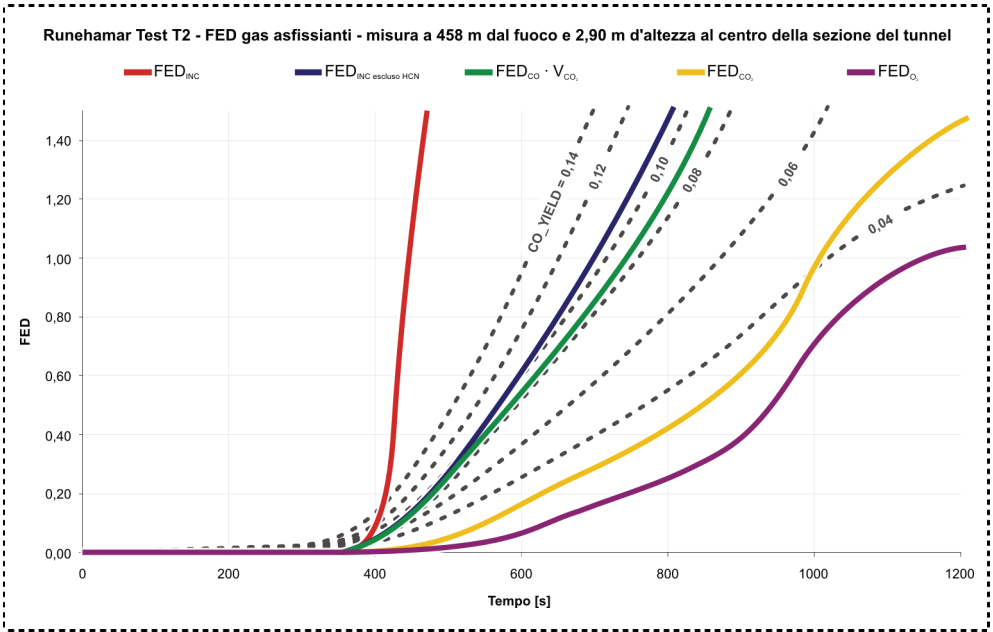

Figura 10.10 - Variazione del FED al variare del parametro CO_YIELD nelle simulazioni riproduttive del test RUNEHAMAR T2. Gli andamenti tratteggiati indicano i valori in output dalle simulazioni secondo l'algoritmo di calcolo della FED interno ad FDS, gli andamenti continui rappresentano quelli reali.

Alcuni recenti studi di ricerca eseguiti in Germania, congiunti ai risultati dei test EUREKA, forniscono i seguenti valori per la CO e la CO_2 nell'incendio di progetto di un vagone di linea metropolitana [71]:

- produzione di CO da 0,02 a 0,08 g/g;
- produzione di CO_2 da 1,5 a 1,9 g/g.

Studi olandesi suggeriscono invece, sempre per l'incendio di progetto di una carrozza passeggeri, valori dei gas tossici come funzione dell'HRR:

- CO: 3330 mg/MW;
- HCl: 1950 mg/MW;
- HCN: 12.5 mg/MW:
- NO_x: 122 mg/MW.

In ogni caso sia l'approccio tedesco che quello olandese ricordano che ognuno di questi numeri è funzione del tipo di materiale bruciato e che pertanto è necessario validarne la loro coerenza con lo scenario che si vuole osservare.

Osservando la Figura 10.10 si nota come l'interpretazione della FED da parte di FDS (andamenti tratteggiati) sia perfettamente coerente con gli andamenti reali misurati durante il test RUNEHAMAR T2. Se poi si considera che tale confronto interessa un punto della galleria posto a circa 458 m dal fuoco, cioè in una zona di campo molto distante dall'origine dei fumi, questo fatto risulta doppiamente confortante in quanto assicura senza ombra di dubbio il corretto funzionamento delle equazioni di trasporto a base degli algoritmi di calcolo FDS+EVAC.

Osservando ancora il grafico si nota facilmente come il valore CO_YIELD = 0,11 risulti sicuramente adeguato a riprodurre la FED da gas asfissianti (escluso HCN). Per quanto riguarda il parametro SOOT_YIELD esistono diversi riscontri in letteratura che permettono di scegliere come valore di riferimento per la combustione del poliuretano un valore di 0,15.

```
&REAC ID='POLYURETHANE',
      C=6.30,
      H=7.10,
      O=2.10,
      N=1.00,
      SOOT_YIELD=0.15,
      CO_YIELD=0.11,
      OTHER=0.002427,
      MW_OTHER=27.00,
      HEAT_OF_COMBUSTION=25300.00,
      /
```

Figura 10.11 - Modellazione della reazione di combustione del poliuretano per FDS.

10.3.4 Studio di osservazione sull'effetto della ventilazione

Nella realizzazione delle simulazioni discusse nel prossimo capitolo, si farà riferimento a tre diversi valori di ventilazione: 1 m/s, 2 m/s, e 3 m/s.

Poiché è ancora una questione aperta quella di comprendere l'effetto della ventilazione sulla temperatura, si è cercato di evidenziare questa relazione almeno nella codifica che può farne il software FDS per il modello costruito in questa sede a riproduzione del test T2 del Runehamar Tunnel.

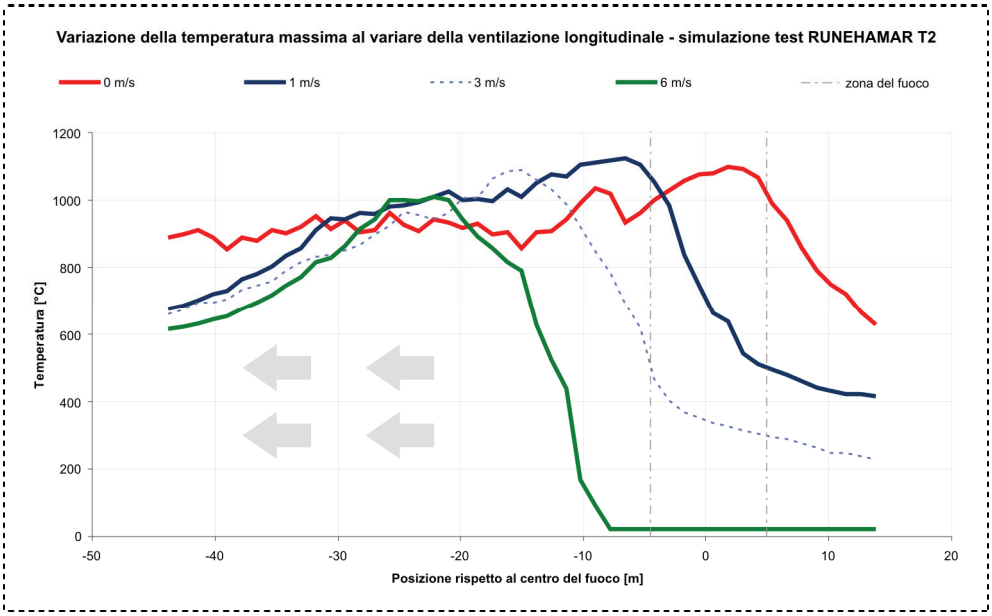

Figura 10.12 - Variazione della temperatura massima sotto il soffitto al variare del valore di ventilazione longitudinale, per il modello del test RUNEHAMAR T2.

Mentre tutte le simulazioni discusse ai paragrafi precedenti sono state eseguite introducendo il valore di 3 m/s, il grafico in Figura 10.12 rappresenta il risultato di quattro simulazioni condotte sullo scenario base al variare del valore di ventilazione longitudinale tra 0 m/s, 1 m/s, 3 m/s e 6 m/s.

Osservando il caso 0 m/s, ovvero il caso in cui la velocità di ventilazione risultante è nulla, si può notare (vedi tratto giallo Figura 10.3) l'influenza dell'asimmetria del campo di analisi, ovvero come il tratto di galleria simulato a destra del fuoco sia inferiore al tratto di

galleria simulato a sinistra.

E' bene osservare che il grafico misura i valori massimi di temperatura registrati dalle termocoppie virtuali, nella zona del fuoco sotto il soffitto della galleria, al variare della simulazione ovvero al variare della velocità di ventilazione longitudinale.

Il fatto che i valori a sinistra restino più alti dei valori a destra anche quando l'effetto della ventilazione è nullo può trovare spiegazione solo nell'esistenza di un maggiore ricambio d'aria in quella parte di campo. Evidentemente la maggiore vicinanza del portale di destra fa si che la quantità di aria miscelata nel plume a destra sia maggiore piuttosto che a sinistra.

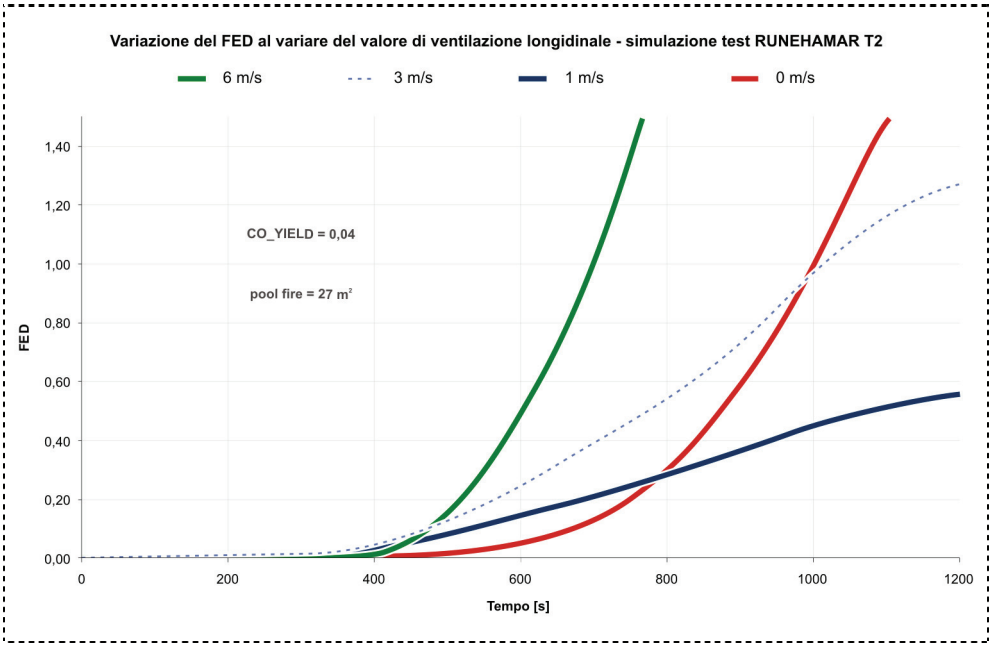

Figura 10.13 - Variazione della FED a 458 m dal fuoco al variare del valore di ventilazione longitudinale, per il modello del test RUNEHAMAR T2.

Sempre osservando la Figura 10.12 si può notare come l'effetto del vento riduca di più di 200°C la temperatura dei fumi alla distanza di circa 40 m dal centro fuoco.

Ciò è coerente con quanto mostrato in Figura 10.13, dalla quale risulta chiaro come l'effetto a distanza sulla FED sia notevolmente dipendente dal valore della velocità di ventilazione longitudinale.

Nei tre casi a ventilazione non nulla la distribuzione della FED, nel punto di misura, risulta praticamente proporzionale all'intensità della ventilazione; tanto più è elevato il flusso d'aria tanto prima viene raggiunta la soglia di incapacitazione.

Nel caso invece a ventilazione nulla l'andamento della curva che definisce la FED è diverso rispetto ai casi precedenti, con la soglia di incapacitazione che viene raggiunta addirittura prima che nel caso di 1 m/s.

In questo caso, anche in virtù delle considerazioni fatte sulla distribuzione delle temperature massime nella zona del fuoco, è probabilmente errata la semplificazione di accorciare il tratto di galleria a destra del fuoco. E' cioè probabile che mancando l'influenza del vento, il comportamento dei fumi risenta di una qualche discontinuità rispetto ai casi a ventilazione non nulla, in virtù di un maggiore ricambio d'aria. Ulteriori e più precise simulazioni potrebbero dare indicazioni a riguardo.

In ogni caso, al crescere del valore di ventilazione da 1 m/s a 6 m/s corrisponde una maggiore esposizione per la zona di galleria sottovento, il che appare corretto.

10.4 CONSIDERAZIONI SULLA TEMPERATURA MASSIMA NEI TUNNEL

I valori di temperatura misurati negli esperimenti del Runehamar, sono stati tra i più alti mai registrati in letteratura per l'incendio di un tunnel. In particolare, durante il test T1 la temperatura di picco dei gas in prossimità del soffitto è stata di 1350 °C, con un picco di HRR valutato intorno ai 200 MW, mentre nel caso del test T2 la temperatura è stata di circa 1250 °C con un picco di HRR pari a 157 MW (Figura 10.4).

In uno studio portato a termine sul Caldecott Tunnel è stato invece dimostrato che, in condizioni geometriche e di ventilazione simili a quelle del Runehamar, la temperatura non ha mai superato i 1100 °C, pur con HRR dello stesso ordine o superiori.

Una spiegazione di questo fatto può individuarsi nello scambio termico, più o meno elevato, tra lo spazio interno al galleria ed il suo contorno.

Nel caso del Runehamar Tunnel era infatti presente nella zona del fuoco un rivestimento di materiale termo-isolante, mentre nel caso del Caldecott Tunnel era presente unicamente un rivestimento di ceramica al quale non sono attribuibili proprietà isolanti di rilievo.

Lo spalling[17] del calcestruzzo osservato nel Caldecott Tunnel dopo il suo incendio ha suggerito, infatti, che i muri non potessero sostenere le alte temperature misurate nelle prove del Runehamar. Lo spalling e l'ablazione hanno sicuramente mantenuto le fiamme a temperature più basse, in virtù del continuo assorbimento di calore necessario alla produzione delle reazioni chimiche dei processi di decomposizione.

Un'osservazione analoga può farsi con riferimento all'esperienza dell'Howard Street Tunnel e dell'incendio che lo ha interessato nel Luglio 2001, per il quale sono state stimate temperature ancora inferiori. In questo caso la differenza non è da attribuirsi alle proprietà termo-isolanti del rivestimento, bensì alla presenza di un diverso regime di ventilazione.

L'Howard Street Tunnel possiede, infatti, una pendenza longitudinale dello 0,8% mentre il Caldecott Tunnel ha visto verificarsi l'incendio in un tratto con pendenza longitudinale decisamente più forte e pari al 4%.

Inoltre, osservazioni sull'effetto del fumo sui muri riportano che nell'incendio del Caldecott Tunnel, il flusso dei fumi è stato mono direzionale (come nel Runehamar Tunnel), mentre nel caso dell'Howard Street Tunnel è stato osservato che il fumo è riuscito a defluire da entrambi i portali. È difficile trarre precise considerazioni sulla taglia di un fuoco sotto-ventilato, ma è assodato che la temperatura dei gas è direttamente proporzionale alla concentrazione di ossigeno che alimenta la combustione, e dunque che un fuoco sotto-ventilato non può svilupparsi allo stesso modo di un fuoco ben-ventilato (condizione che si ha efficacemente nei tunnel quando il flusso dei fumi è mono direzionale).

Dunque i due più importanti fattori nell'incendio di un tunnel sono il ricambio di aria fresca (carica di ossigeno) e le proprietà termo-isolanti del rivestimento. Il carico di combustibile, non è un fattore che limita la temperatura, anche se certamente ne limita la durata nel tempo. Le temperature più alte si realizzano così in fuochi con ventilazione elevata e muri efficacemente isolati.

---

[17] Il termine "spalling" è comunemente usato per descrivere il deterioramento fisico del calcestruzzo. Con il termine ablazione si intendono invece tutte le reazioni di degradazione, come lo spalling (che inizia a circa 100 °C), la decarbonizzazione (che inizia a circa 700 °C) e le altre reazioni di decomposizione del materiale (che iniziano a circa 1000 °C).

CAPITOLO 11

DEFINIZIONE E STUDIO DI UNA CLASSE DI SCENARI PER L'ANALISI DEI RISULTATI DEL MODELLO

11.1 INTRODUZIONE

Una volta definita e validata la struttura di un modello numerico di simulazione base per la valutazione degli effetti dell'incendio sull'esodo in galleria ferroviaria, si è voluto ulteriormente indagare sulla validità predittiva del modello stesso, con lo studio di alcuni scenari d'incendio opportunamente costruiti.

In particolare, a partire dall'evento critico iniziatore incendio, sono stati studiati 58 scenari incidentali definiti in riferimento ad un'applicazione concreta dell'analisi di rischio, coerentemente con quanto prescritto agli Annessi A e D_2 del Decreto Ministeriale 28/10/2005.

La procedura illustrata risulta pertanto analizzabile sotto due aspetti distinti. In primo luogo è possibile effettuare una valutazione critica dei risultati delle 58 simulazioni condotte, con l'obiettivo di affinare ulteriormente i settaggi e gli input del modello numerico definiti ai capitoli precedenti.

In secondo luogo è invece possibile estendere il procedimento nell'ottica di una "analisi quantitativa delle conseguenze", determinando cioè il danno associato ad ogni scenario che, congiuntamente alla relativa probabilità di accadimento definita tramite opportune tecniche di analisi probabilistica, pone le basi per la metodologia dell'analisi di rischio estesa nonché per un ulteriore procedimento di "caratterizzazione prestazionale delle misure di sicurezza" antincendio analizzate[18].

Il metodo proposto si basa sull'utilizzo dei modelli automatici di simulazione numerica FDS ed EVAC già discussi ai precedenti capitoli. Attraverso la sperimentazione virtuale,

---

[18] Quest'ultimo aspetto è stato approfondito nel lavoro del dott. ing. Marco Santo SPINELLI nella sua Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie "SICUREZZA NELLE GALLERIE FERROVIARIE: ANALISI PRESTAZIONALE DELLE MISURE DI SICUREZZA ANTINCENDIO".

quale strumento predittivo del reale, risulta possibile determinare lo sviluppo spazio-temporale del fenomeno incendio e le relative condizioni finali raggiunte dagli occupanti nel loro percorso di esodo all'interno della galleria.

La procedura si articola, sostanzialmente, nei seguenti passi:

1. costruzione di una classe di scenari rilevanti di progetto;
2. caratterizzazione della suddetta classe di scenari attraverso la quantificazione, mediante FDS ed EVAC, del flusso del pericolo ovvero dell'evoluzione dell'incendio e della risoluzione degli scenari di esodo per la popolazione esposta (analisi di scenario);
3. caratterizzazione degli stati di fine emergenza attraverso l'individuazione dei danni ai ricettori sensibili (computo del numero di vittime - analisi probabilistica del rischio).

11.2 DEFINIZIONE DI UNA CLASSE DI SCENARI RILEVANTI DI PROGETTO

Per determinare, tra tutte le possibili evoluzioni incidentali conseguenti all'evento critico iniziatore incendio, una classe di scenari sufficientemente indicativa, si è proceduto individuando in successione:

1. **tre scenari base** o di riferimento;
2. **una serie di scenari derivati**, ottenuti da quelli base a seguito della introduzione di un certo numero di misure di sicurezza e dei relativi range operazionali;
3. **cinquantotto scenari rilevanti di progetto**, selezionati tra gli scenari derivati in base alle prescrizioni normative, agli obiettivi degli stakeholder (gestore della rete e imprese ferroviarie), all'esperienza derivante dall'analisi di studi similari presenti in letteratura, ai dati statistici ed alle stime della probabilità di accadimento disponibili.

Si precisa, nell'ottica della logica imposta dai principi dell'analisi di rischio, che i 58 scenari considerati in definitiva, risultano tra loro mutuamente disgiunti e dunque incompatibili, in modo tale che il rischio complessivo per il sistema galleria risulti computabile come somma dei rischi connessi ai singoli scenari.

11.2.1 Scenari Base o di Riferimento

L'ipotesi che sta alla base di ogni considerazione è quella del simultaneo verificarsi d'incendio con perdita di mobilità del rotabile e sosta in galleria, in relazione alla sola salvabilità della vita umana in condizioni di autosoccorso.

A tale scopo, tra tutti i possibili scenari incidentali che coinvolgono un solo treno o che presentano una mutua interazione tra treni, sono state considerate le seguenti classi incidentali:

(A) incendio in un treno passeggeri fermo in galleria;

(B) incendio in un treno merci e contemporanea presenza di un treno passeggeri, fermi entrambi in galleria;

(C) incendio in un treno merci pericolose e contemporanea presenza di un treno passeggeri, fermi entrambi in galleria.

Si sono escluse a priori le combinazioni "treno merci / treno merci", "treno merci pericolose / treno merci pericolose", "treno merci / treno merci pericolose" poiché, considerando quale ricettore sensibile il solo fattore uomo, esse conducono a conseguenze in termini di danno assolutamente trascurabili, sebbene i relativi scenari incidentali ipotizzabili siano più gravosi in termini di potenza termica sviluppata.

E' stata esclusa anche la combinazione "treno passeggeri / treno passeggeri" perché sostanzialmente essa ha la sola proprietà di incrementare il numero delle persone esposte al rischio incendio, non aumentando viceversa, in termini assoluti, la gravità dell'analogo evento incidentale di classe (A).

Si precisa inoltre, che mentre la classe incidentale di tipo (A) può verificarsi in ogni configurazione geometrica del sistema galleria, le classi incidentali di tipo (B) e (C) sono possibili solo ed esclusivamente in sistemi galleria a singola canna e doppio binario.

Le tre classi incidentali prima individuate risultano compatibili con gli scenari pericolosi presi a riferimento nei documenti redatti dalle F.S. (Linee Guida per il miglioramento della Sicurezza nelle Gallerie Ferroviarie - 1997), con gli analoghi scenari considerati nel redigere i piani interni di emergenza per le lunghe gallerie ferroviarie (lunghezza non inferiore ai 5000 metri), nonché, con le disposizioni in materia di trasporto ferroviario di merci pericolose, regolate dal R.I.D. (Reglement concernant le trasport International ferroviaire des marchandises Dangereuses).

E' chiaro che nella realtà, tra i due eventi incendio e perdita di mobilità del rotabile, esiste un transitorio più o meno breve, in base alla localizzazione del focolaio d'incendio (che nello studio in oggetto si considera sempre in carrozza al fine di massimizzare il carico d'incendio), all'incidenza del fuoco sui dispositivi di movimento, alla possibilità di azionamento del freno di emergenza, alla presenza o meno, in prossimità della galleria, di impianti fissi per la rilevazione della temperatura a bordo treno di tipo RTB (Rilevamento Temperatura Boccole) o mediante Portali Termografici.

Analogamente esisterà un transitorio tra l'arresto del primo treno incendiato e l'arresto del secondo treno che sopraggiunge dal binario opposto che dipenderà dal tempo di blocco della linea, dal tempo di cadenzamento tra i treni, dal tempo di frenatura in emergenza.

Questo modo di operare però consente di considerare il rotabile sempre immobile in galleria, in una ben definita posizione, e per di più soggetto alle peggiori condizioni critiche legate al fuoco, in quanto si impone che l'intero ciclo di vita dell'incendio si verifichi in ambiente confinato.

Inoltre, in via precauzionale, si suppongono inefficaci gli interventi delle squadre di soccorso al fine di mettere in salvo passeggeri e personale di bordo, essendo esse ubicate non in loco ed i tempi di soccorso il più delle volte rilevanti.

Classe Incidentale	Probabilità di Accadimento
A	$1{,}14 \times 10^{-5}$
B	$1{,}42 \times 10^{-6}$
C	$6{,}10 \times 10^{-7}$

Tabella 11.1 - Probabilità di accadimento per le classi incidentali (A), (B) e (C).

L'autosoccorso risulta assolutamente determinante negli scenari incidentali dovuti ad incendio, mentre gli interventi di soccorso lo sono maggiormente negli scenari incidentali causati da collisioni e deragliamenti.

A titolo esemplificativo, si riporta in Tabella 11.1 la probabilità di accadimento delle classi incidentali (A), (B) e (C) sopra considerate. Tale tabella riporta i dati estrapolati da studi condotti dalle F.S. relativamente alla valutazione del rischio per gallerie ferroviarie lunghe 8 km, con traffico misto passeggeri (70%) / merci (30%) di 320 treni/giorno, percentuale di merci pericolose del 30% sul totale merci ed assenza di predisposizioni di sicurezza attiva.

I valori presenti in Tabella 11.1 sono determinati a partire dai relativi ratei incidentali r_{inc} (Tabella 11.2) validi per l'intera rete ferroviaria italiana e calcolati su dati statistici nazionali ed internazionali (progetto EUREKA EU 499 FireTun), in funzione del numero di treni giorno, della lunghezza della galleria, della probabilità di arresto del convoglio incendiato in galleria e della probabilità di arresto in galleria di un secondo treno passeggeri.

Evento Incidentale	r_{inc} [incendi / treno · km]
Incendio in un Treno Passeggeri	$9{,}00 \times 10^{-11}$
Incendio in un Treno Merci	$1{,}80 \times 10^{-10}$
Incendio in un Treno Merci Pericolose	$1{,}80 \times 10^{-10}$

Tabella 11.2 - Ratei Incidentali per gli eventi iniziatori delle classi incidentali (A), (B) e (C)

Per ciò che attiene alle caratteristiche dell'incendio degli scenari incidentali base prima individuati, si adottano le seguenti condizioni di riferimento reperite dalla letteratura specialistica e coincidenti con le più gravose tra quelle realisticamente ipotizzabili nelle più comuni condizioni di esercizio:

- HRR di picco pari a 10 MW per la classe incidentale (A), incendio a crescita media (1 MW in 300 secondi), poi costante per tutta la durata della simulazione una volta raggiunto il valore di HRRmax;
- HRR di picco pari a 50 MW per la classe incidentale (B), incendio a crescita veloce (1 MW in 150 secondi), poi costante per tutta la durata della simulazione una volta raggiunto il valore di HRRmax;
- HRR di picco pari a 100 MW per la classe incidentale (C), incendio a crescita ultraveloce (1 MW in 75 secondi), poi costante per tutta la durata della simulazione una volta raggiunto il valore di HRRmax;
- Incendio localizzato nella parte centrale del tunnel in corrispondenza della carrozza ristorante se di classe (A) oppure del carro merci centrale se di classe (B) o (C).

L'incendio, modellato nella fase di crescita in termini di curve quadratiche tipo $\boldsymbol{\alpha t^2}$ per il rilascio della potenza termica nel tempo (vedi paragrafo 2.6.2), viene considerato come un pool fire da poliuretano, materiale, tra quelli presenti sulla carrozza tipo, che possiede il comportamento più severo dal punto di vista della partecipazione al fuoco e della produzione dei prodotti tossici della combustione (CO ed HCN). Sulla base dell'esperienza

che ha condotto alla stesura finale del presente lavoro, si è scelto di modellare numericamente il sistema “incendio / carrozza” come un pool fire di 3,00 x 9,00 = 27 m^2 posto alla quota del piano interno della carrozza, privando la carrozza stessa delle pareti laterali e del tetto. L’effetto dei diversi HRR è ottenuto variando l’HRR per unità di superficie della pozza.

I tre scenari incidentali di base (A), (B) e (C) prima individuati, consentono di sottoporre il sistema galleria a tre differenti incendi di progetto la cui gravità aumenta sensibilmente nel passaggio dalla prima all’ultima classe, mentre viceversa, il numero dei soggetti esposti al rischio rimane costante. In termini di progettazione in funzione del rischio, sulla base dei risultati delle simulazioni che possono condursi, si ha che:

- la classe incidentale (A) assume il significato di scenario “best”;
- la classe incidentale (B) assume il significato di scenario “middle”;
- la classe incidentale (C) assume il significato di scenario “worst”.

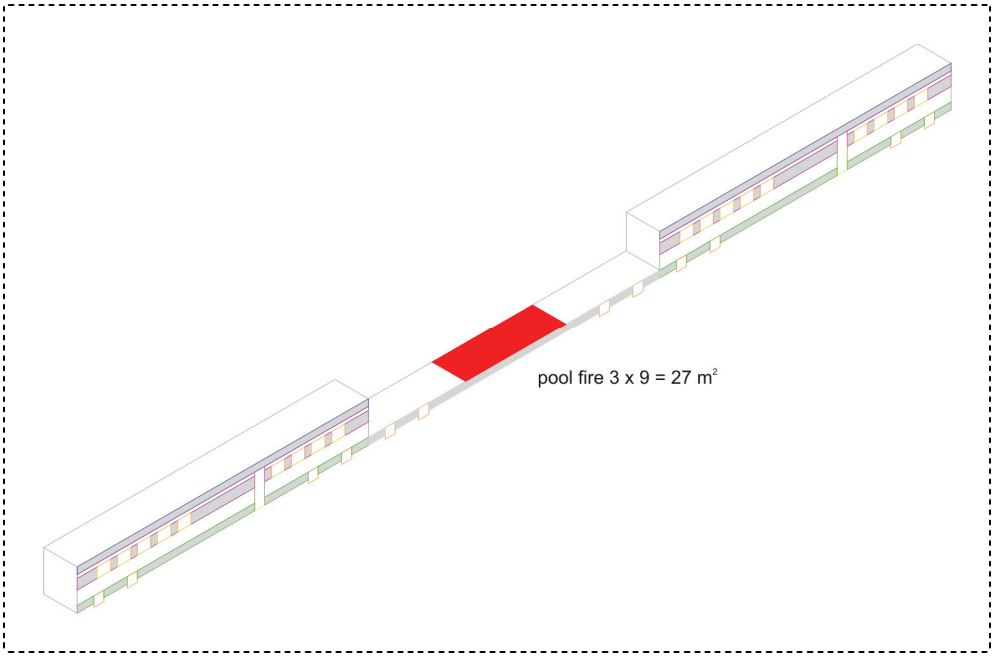

Figura 11.1 - Configurazione pool fire e carrozzeria treno. Vista assonometrica parziale.

Le caratteristiche della struttura della galleria adottate per gli scenari base prevedono

una lunghezza base di 1000 m, intendendo per lunghezza non già quella complessiva ma la lunghezza efficace pari all'interdistanza tra due uscite/accessi consecutivi anche intermedi.

Le sezioni trasversali adottate derivano dal manuale di progettazione in uso presso il gestore italiano della rete ferroviaria relativamente alle gallerie naturali realizzate con scavo meccanizzato e destinate alla rete ferroviaria transeuropea per il transito di convogli con velocità di esercizio fino a 300 km/h, che prevede le seguenti dimensioni:

- area 71 m^2, sezione monodirezionale, singolo binario, marciapiede unico di 180 cm;
- area 117 m^2, sezione bidirezionale, doppio binario, marciapiede doppio di 120 cm.

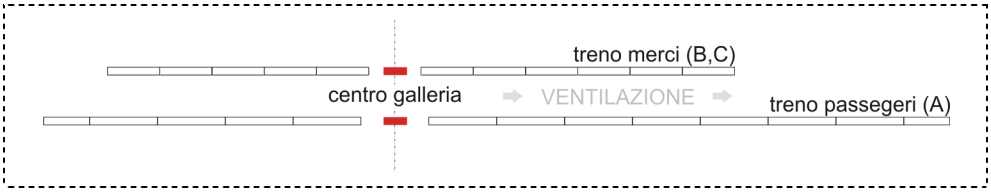

Figura 11.2 - Posizione carrozza pool fire. Vista totale dall'alto.

Variando opportunamente le dimensioni del marciapiede laterale e l'area della sezione trasversale si sono ottenute due ulteriori configurazioni geometriche:

- area 53 m^2, sezione monodirezionale, singolo binario, marciapiede unico di 90 cm;
- area 107 m^2, sezione bidirezionale, doppio binario, marciapiede doppio di 90 cm;

Per ciò che attiene alle caratteristiche del materiale rotabile, si è assunto come convoglio prototipo, coerentemente con le assunzioni fatte per le sezioni trasversali delle gallerie, il treno **ETR500** oggi in esercizio nella rete italiana AV/AC, di cui nel seguito si riassumono le caratteristiche principali:

- composizione bloccata, formata da dodici carrozze (una di prima classe speciale con 26 posti a sedere, tre di prima classe normale con 52 posti ciascuna, una carrozza ristorante, sette di seconda classe con 68 posti ciascuna) e da due motrici di testa, per una lunghezza complessiva di 354 metri;
- coefficiente di riempimento identico per ogni carrozza e pari al 100% (persone distribuite in ogni carrozza secondo la reale disponibilità dei posti a sedere);

- 6 componenti dello staff tecnico collocati a coppie di due rispettivamente nella

motrice, nel compartimento capotreno e nella carrozza ristorante;

- incendio sul vagone ristorante, in posizione centrale rispetto alla galleria.

Figura 11.3 - Carrozza ristorante di un ETR 500 e relativa discretizzazione EVAC e FDS.

Nel caso delle classi incidentali (B) e (C) che considerano la presenza in galleria di un treno merci, si adottano per lo stesso le seguenti caratteristiche:

- composizione formata da dodici carri merci tradizionali e da una motrice di testa per una lunghezza complessiva di 260 metri;
- componenti dello staff tecnico pari a 2 persone e collocate nella motrice;

- incendio nel carro merci centrale, in posizione centrale rispetto alla galleria.

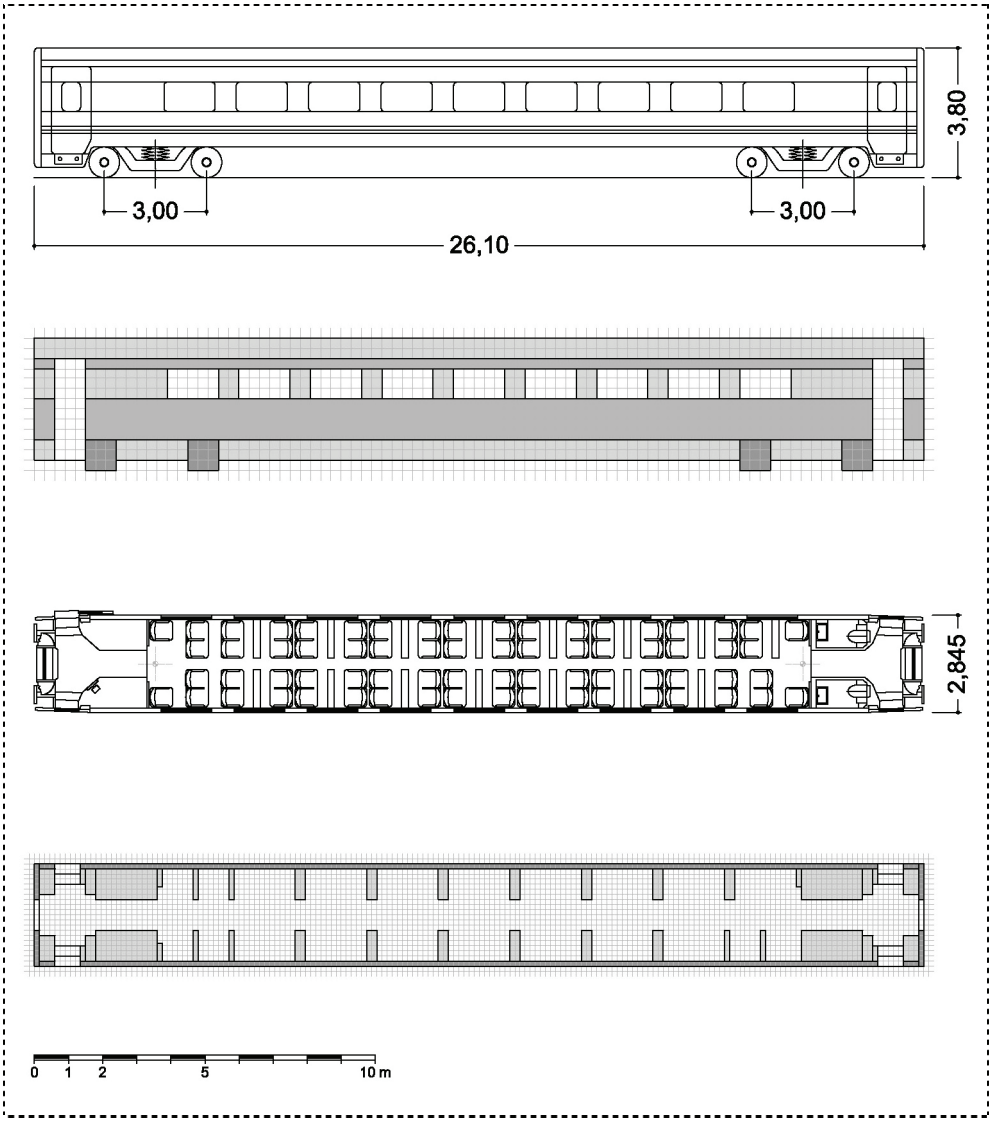

Figura 11.4 - Carrozza di seconda classe di un ETR500 e relativa discretizzazione FDS ed EVAC.

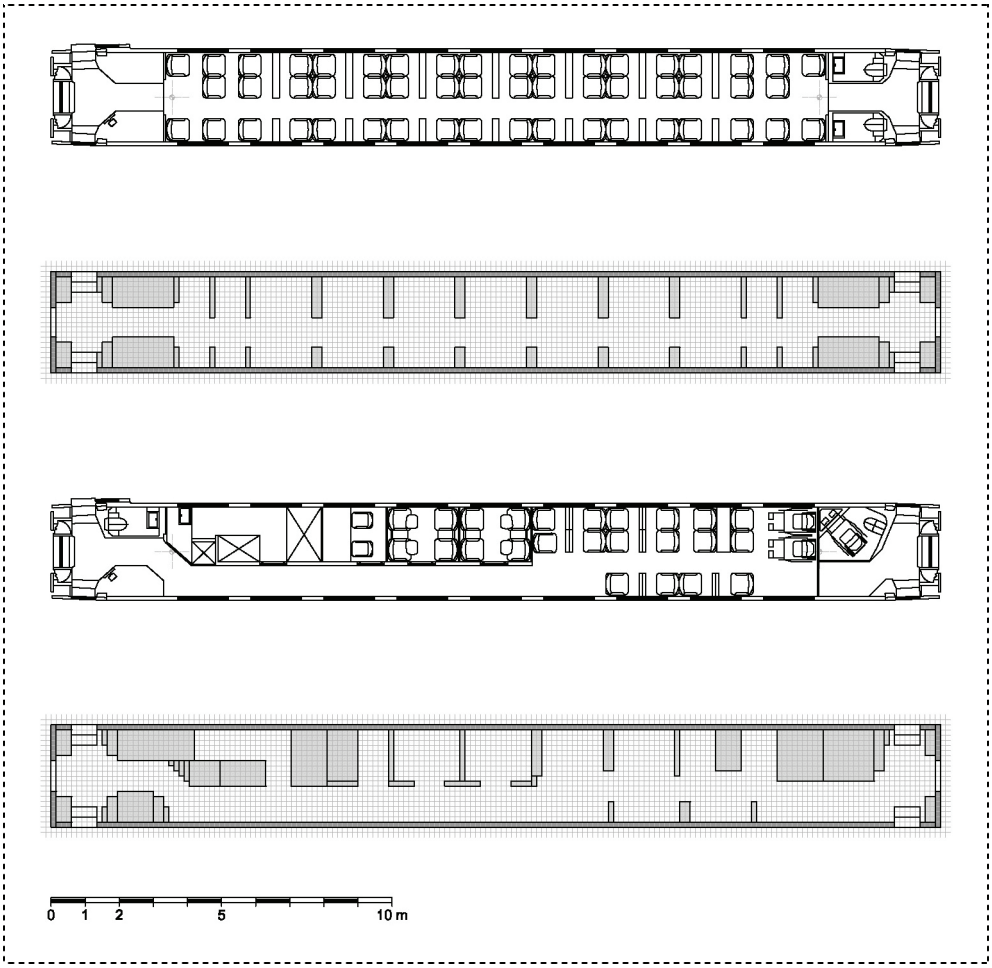

Figura 11.5 - Carrozze di prima classe (normale e speciale) di un ETR500 e relativa discretizzazione.

Il modello di esodo adottato per le persone esposte agli eventi incidentali (A), (B) e (C) prevede:

- una esposizione di 664 persone per il treno passeggeri (staff tecnico + capacità del convoglio);
- un'uguale esposizione per il treno merci (si trascurano i due macchinisti dello staff tecnico del treno merci);
- soggetti esposti di tipo "adulto", per i quali si adotta una velocità base o indisturbata di esodo pari a 1,25 m/s (percorso piano, superficie calpestabile, assenza di

qualunque condizionamento ambientale), una velocità di esodo in discesa del treno ridotta secondo un fattore ½, tempi di reazione distribuiti normalmente con media pari a 60 secondi e deviazione standard pari a 20 secondi.

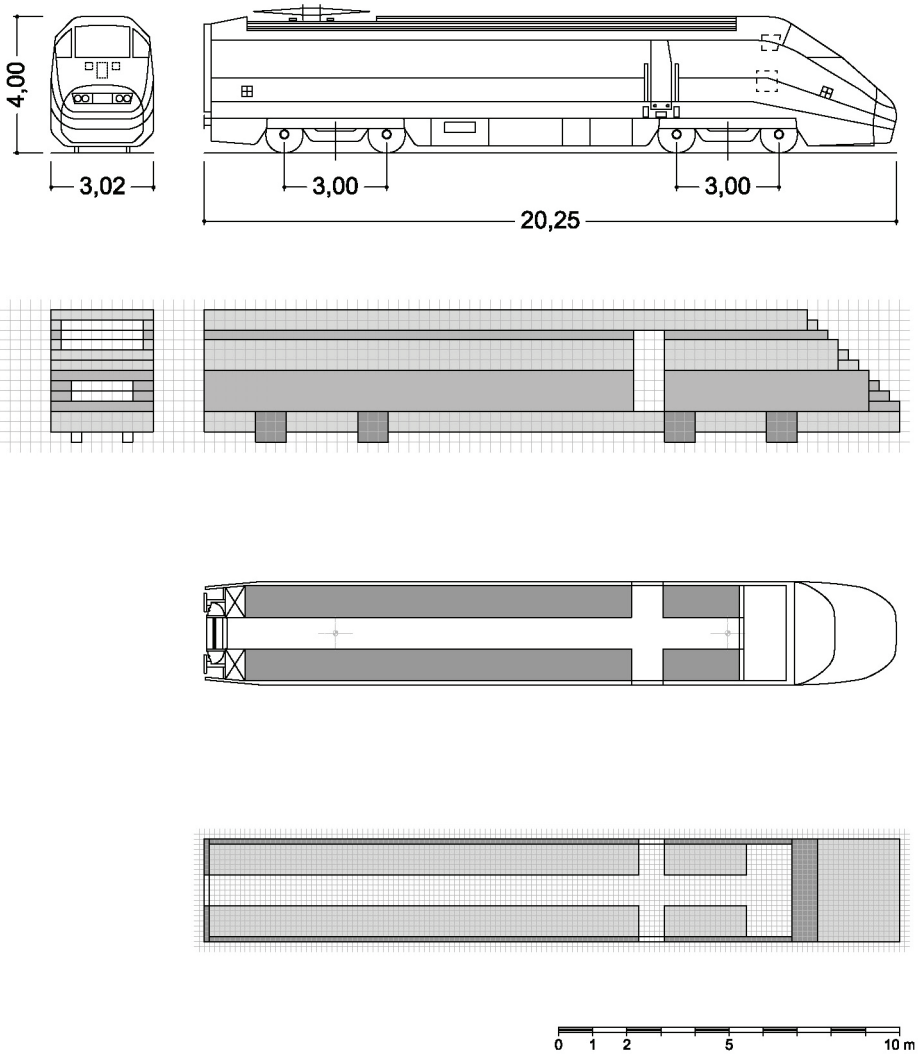

Figura 11.6 - Motrice di un ETR500 e relativa discretizzazione.

Il tempo di percezione, di cui si dirà più avanti, si assume coincidente con i tempi legati all'attivazione e comunicazione dell'allarme incendio.

Il tempo di reazione corrisponde, noto il pericolo, al tempo richiesto dalle persone per iniziare l'esodo e dipende da una molteplicità di fattori quali:

- ricezione, riconoscimento, interpretazione e validazione dell'allarme inviato sia diretto (sonoro, visivo, verbale, olfattivo) che indiretto (interruzione del servizio);
- capacità percettive dell'individuo (età, genere, condizioni fisiche), attività da esso svolte, percepibilità e tipologia del segnale di allarme inviato;
- comportamento delle persone vicine, ricerca di ulteriori informazioni o indizi a conferma dell'allarme ricevuto, grado di informazione e di esperienza con le procedure di emergenza, ruolo e responsabilità sociale dell'individuo;
- ricerca di familiari o di oggetti personali, messa in atto di azioni quali avvisare o aiutare altre persone, tentare l'estinzione dell'incendio.

Data la grande variabilità del tempo di percezione si è adottata, in relazione ai dati disponibili in letteratura, una distribuzione di Gauss tale da garantire che al più entro 120 secondi dall'attivazione dell'allarme incendio, tutte le persone esposte al flusso del pericolo iniziassero l'esodo.

L'ambiente interno alla galleria in condizioni pre-incidentali viene simulato assumendo:

- temperatura ambiente pari a 20°C;
- concentrazione di ossigeno pari al 20,70% in volume (valore in atmosfera al livello del mare);
- pressione atmosferica pari a 101325 Pa (1 atmosfera).

Il modello di calcolo adottato per la simulazione (FDS + EVAC) prevede inoltre la scelta dei seguenti ulteriori parametri di input:

- dimensione delle celle di discretizzazione del dominio tridimensionale del fuoco (dominio FDS) pari a 0,30 m x 0,30 m x 0,30 m;
- dimensione delle celle di discretizzazione del dominio bidimensionale dell'esodo (dominio EVAC) pari a 0,15 m x 0,15 m;
- tempo di simulazione pari a 40 minuti.

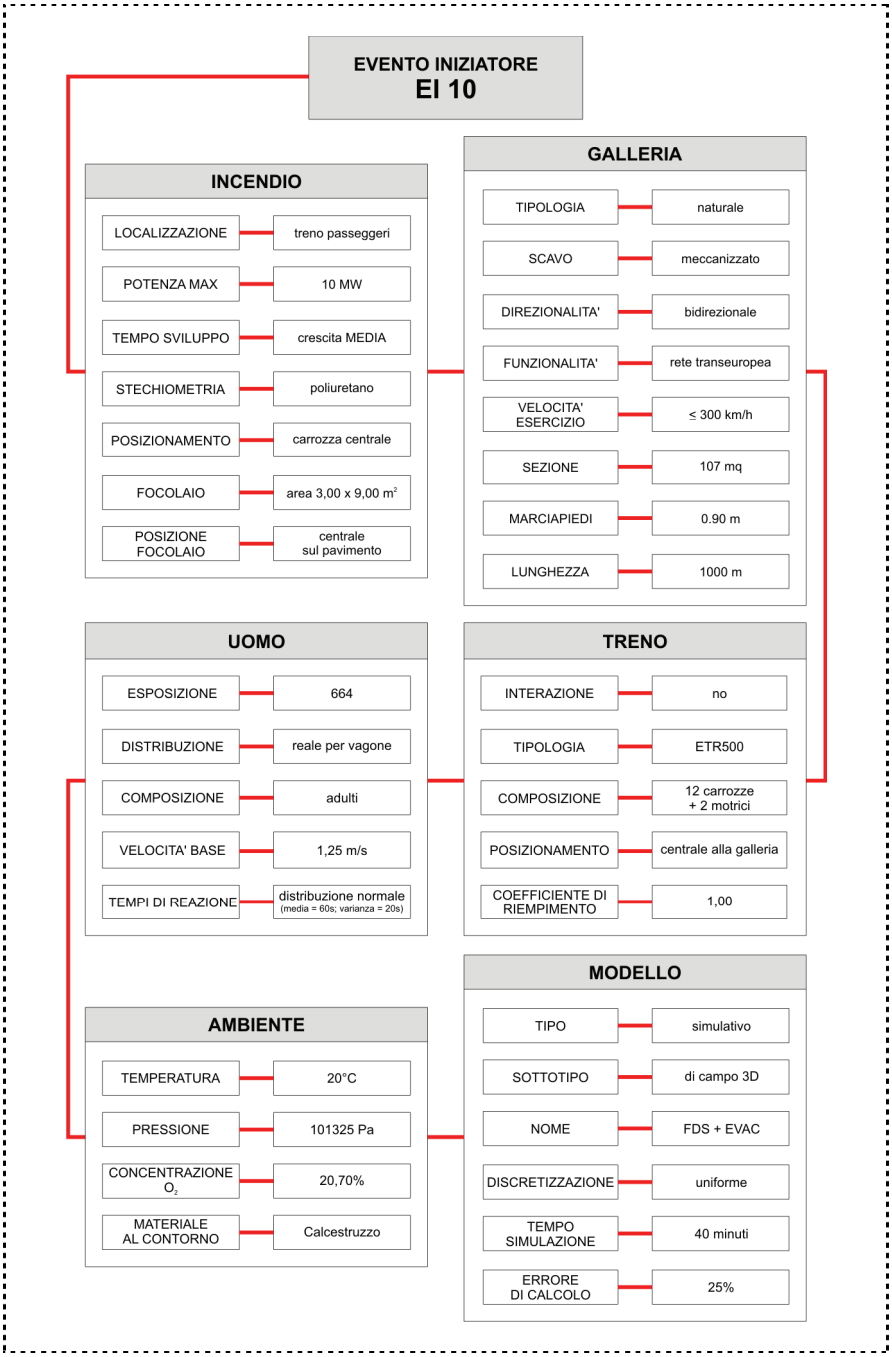

Figura 11.7 - Albero degli eventi fenomenologico evento iniziatore base EI.10

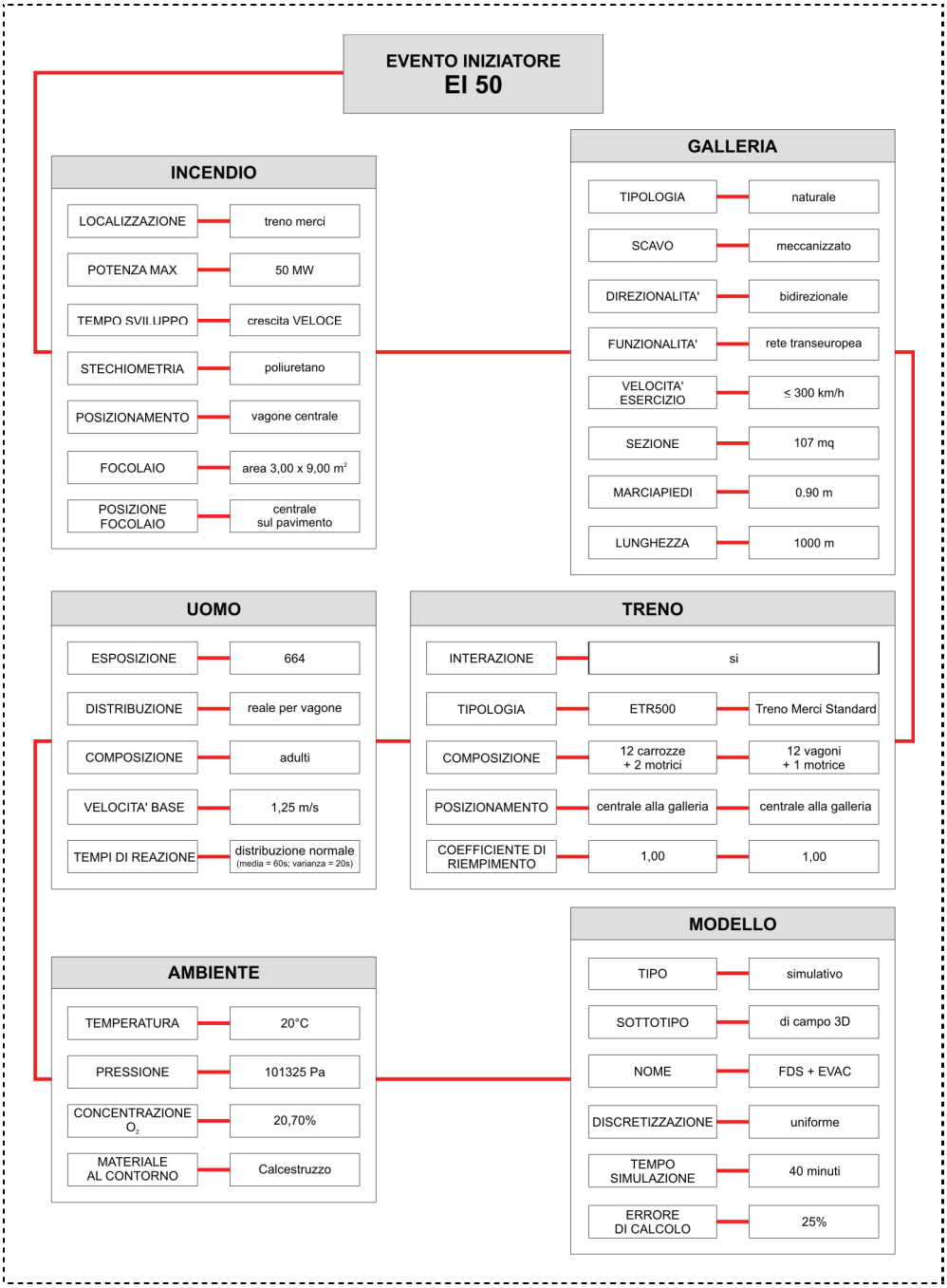

Figura 11.8 - Albero degli eventi fenomenologico evento iniziatore base EI.50

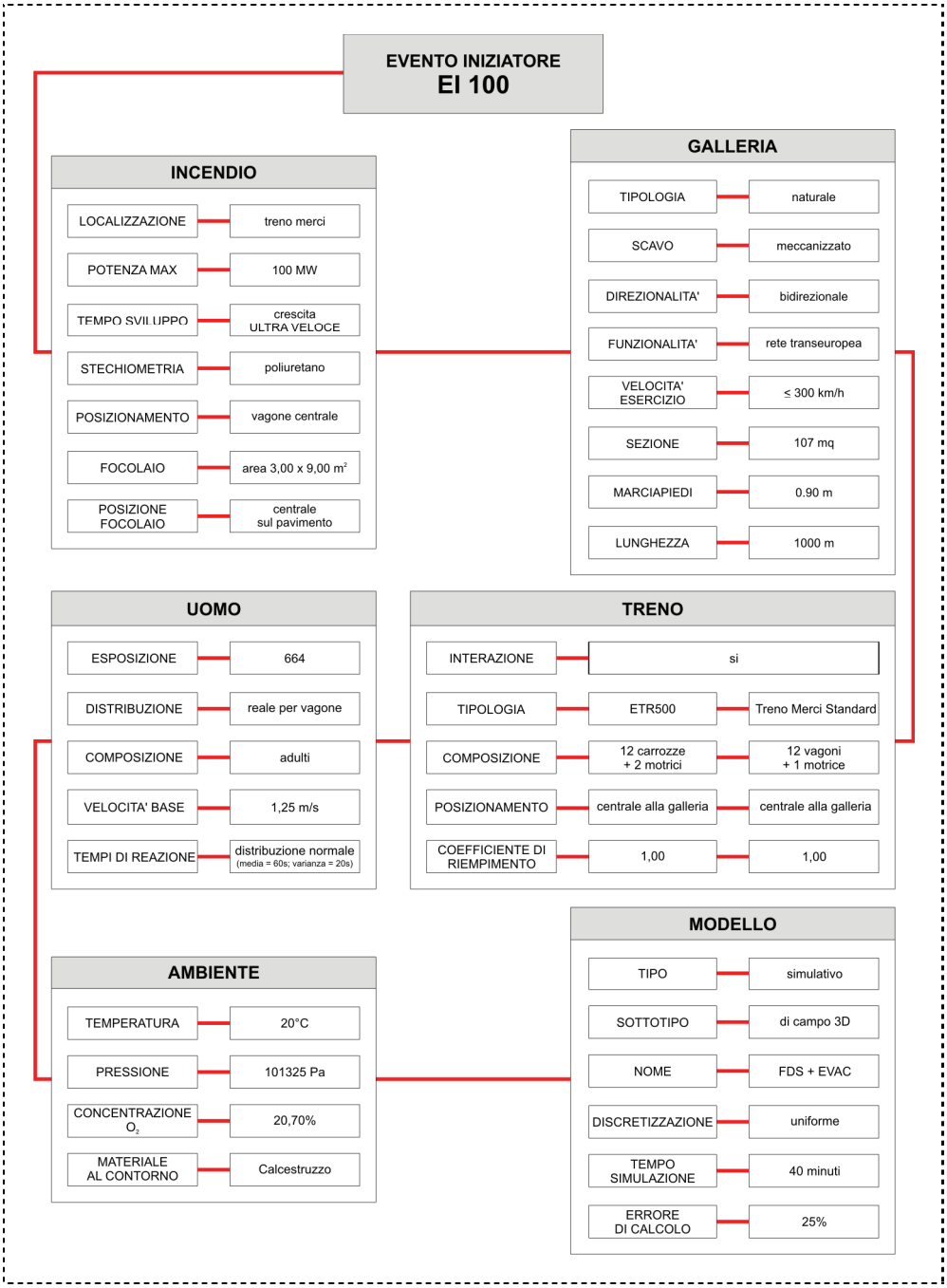

Figura 11.9 - Albero degli eventi fenomenologico evento iniziatore base EI.100

Per praticità, nella trattazione dei risultati che si otterranno dalle simulazioni, d'ora innanzi, le tre classi incidentali definite e caratterizzate come sopra detto, vengono rinominate rispettivamente:

- la classe incidentale (A) come EI_10, con evento iniziatore da 10 MW di picco;
- la classe incidentale (B) come EI_50, con evento iniziatore da 50 MW di picco;
- la classe incidentale (C) come EI_100, con evento iniziatore da 100 MW di picco.

Nelle figure che seguono (Figura 11.7 - Figura 11.8 - Figura 11.9) sono riassunti nella forma di un albero degli eventi di tipo fenomenologico, i principali dati di input adottati nella definizione dei tre scenari base o di riferimento fin qui esposti.

Si chiarisce infine, che per albero degli eventi fenomenologico si intende, non già la versione standard, comunemente utilizzata per il calcolo delle probabilità di accadimento di ogni singolo scenario in relazione al funzionamento o malfunzionamento dei singoli sistemi considerati, bensì la sola rappresentazione grafica dei singoli scenari incidentali considerati in funzione della variabilità dei parametri caratteristici dei sistemi componenti valutati.

11.2.2 Scenari Derivati

Gli scenari incidentali derivati sono stati ottenuti, a partire dai tre scenari base descritti al paragrafo precedente, introducendo una serie di misure di sicurezza antincendio e variando una alla volta le variabili di funzionamento di ciascuna misura.

Tenendo conto delle ipotesi semplificative già introdotte per l'individuazione degli scenari base e della classificazione delle salvaguardie realizzata dal D.M. 28/10/2005, si assume unitaria la probabilità di malfunzionamento delle misure di sicurezza relative al sottosistema "procedure operative" (si suppongono inefficaci gli interventi delle squadre di soccorso) e si considera quindi, la sola presenza delle predisposizioni di sicurezza appartenenti ai sottosistemi "**infrastruttura**" e "**materiale rotabile**" ed alle relative sottoclassi "mitigazione degli incidenti" e "facilitazione dell'esodo" che di seguito si elencano:

- marciapiede;
- sezione trasversale della galleria;
- uscite/accessi in galleria;
- larghezza porte uscite/accessi in galleria;

- vie di esodo a bordo treno;
- porte di uscita/accesso a bordo treno;
- sistema di ventilazione longitudinale in galleria;
- sistema illuminazione di emergenza in galleria;
- sistema illuminazione di emergenza a bordo treno;
- sistema di rilevazione incendio;
- sistema di comunicazione allarme.

Non si simulano i percorsi di esodo realizzati all'interno delle uscite/accessi intermedi (finestre, pozzi, collegamenti trasversali tra canne parallele, collegamenti trasversali/altimetrici tra galleria e galleria parallela di sicurezza o tra galleria e cunicoli di emergenza sotto-traccia, laterali, al controsoffitto, comunque interni alla sezione) poiché si considerano luoghi e vie di fuga sicuri in quanto sempre protetti (è un requisito minimo) da sistemi di compartimentazione strutturali (porte REI) e/o impiantistici (pressurizzazione mediante ventilatori longitudinali, lame d'aria, lame d'acqua). Cosicché, una volta attraversati i varchi d'ingresso alle uscite/accessi intermedi, la generica persona interessata, si ritiene fuori pericolo.

Non si simulano i sistemi strutturali di estrazione o evacuazione del fumo quali camini e pozzi di ventilazione, in quanto il loro funzionamento, oltre all'ampiezza della sezione trasversale ed alla interdistanza, è fortemente condizionato dall'altezza di sbocco che, dipendendo dall'orografia del territorio attraversato e dalle coperture della galleria, risulta molto variabile di caso in caso e dunque difficilmente standardizzabile.

Non si simulano i sistemi di estinzione incendio, automatici o manuali, a bordo treno o in galleria, in quanto la loro azione di spegnimento sul focolaio d'incendio non risulta simulabile nelle condizioni standardizzate adottate per la sorgente: imponendo una curva di rilascio della potenza termica, si stabilisce a priori la potenza massima raggiunta, la durata dell'incendio, il tempo di inizio e di fine evento e dunque anche la fase di estinzione risulta obbligata nella sua evoluzione fisico-chimica all'interno dell'ambiente considerato.

Ciascuna misura di sicurezza precedentemente elencata possiede una propria funzione protettiva o di sicurezza dipendente dalle condizioni di intervento (variabili di funzionamento) e dal contesto ambientale in cui è posta (variabili di stato o di processo o parametri di sicurezza del sistema galleria).

Non tutte le misure di sicurezza elencate hanno una funzione di sicurezza indipendente dalle altre. Il funzionamento del marciapiede risulta condizionato dalla sezione trasversale della galleria, dalle uscite/accessi intermedi e localmente anche dalle porte di quest'ultimi: in particolare esiste una corrispondenza biunivoca tra il valore assunto dalla variabile che descrive la sezione trasversale ed i valori assunti dalla variabile che descrive il marciapiede.

Analogamente le vie di esodo a bordo treno risultano localmente e/o globalmente condizionate dalle relative porte di uscita/accesso. I sistemi di illuminazione di emergenza in galleria ed a bordo treno sono tra loro mutuamente e localmente (nel tratto occupato dal convoglio ferroviario) condizionati a causa delle superfici trasparenti delle carrozze che permettono il reciproco illuminamento. A sua volta il sistema di comunicazione allarme è condizionato, in termini relativi, dal sistema di rilevazione incendio, in quanto non potrà attivarsi il primo senza che il secondo non abbia preventivamente compiuto la sua specifica missione: pur tuttavia, su scala temporale assoluta, le variabili di funzionamento dei due sistemi risultano indipendenti.

Nella Tabella 11.3 vengono riassunte, per ciascuna misura di sicurezza, le relative variabili di funzionamento ed i valori da esse assunte nelle diverse simulazioni condotte.

Della larghezza dei marciapiedi laterali e dunque delle aree delle sezioni trasversali, si è già detto nel paragrafo precedente a proposito degli scenari base. Qui si vuole soltanto sottolineare che i valori assunti dalla larghezza del marciapiede derivano sostanzialmente dalle prescrizioni imposte dal Decreto Ministeriale 28/10/2005:

- larghezza non inferiore a 0,50 m in gallerie di lunghezza inferiore a 2000 m;
- larghezza non inferiore a 0,90 m in gallerie di lunghezza superiore a 2000 m;
- larghezza non inferiore a 1,20 m per uscite/accessi intermedi, eccezionalmente riducibile a 0,90 m.

Dunque riassumendo, tenuto conto delle scelte effettuate negli scenari base a proposito delle sezioni trasversali appartenenti al manuale di progettazione gallerie del gestore di rete e delle successive modifiche ad esse apportate, si sono ottenute di conseguenza le complessive sette combinazioni sezione-marciapiede che di seguito si elencano:

- area 47 m^2, sezione monodirezionale, singolo binario, marciapiede unico di 50 cm;
- area 53 m^2, sezione monodirezionale, singolo binario, marciapiede unico di 90 cm;
- area 59 m^2, sezione monodirezionale, singolo binario, marciapiede unico di 120 cm;

- area 71 m^2, sezione monodirezionale, singolo binario, marciapiede unico di 180 cm;
- area 94 m^2, sezione bidirezionale, doppio binario, marciapiede doppio di 50 cm;
- area 107 m^2, sezione bidirezionale, doppio binario, marciapiede doppio di 90 cm;
- area 117 m^2, sezione bidirezionale, doppio binario, marciapiede doppio di 120 cm.

Si fa notare infine, che l'operazione di modifica delle sezioni standard in uso presso il gestore, che a prima impressione potrebbe risultare arbitraria se vista in termini di nuova progettazione, nel contesto del presente studio viene effettuata per tenere conto della variabilità delle sezioni e dei marciapiedi presenti nelle gallerie attualmente esistenti ed in esercizio, al fine di valutarne il comportamento negli scenari d'incendio considerati.

MISURA DI SICUREZZA	VARIABILE DI FUNZIONAMENTO	VALORI ASSUNTI DALLE VARIABILI DI FUNZIONAMENTO
Sezione Trasversale	area [m^2]	monodirezionale: 47 - 53 - 59 - 71
		bidirezionale: 94 - 107 - 117
Marciapiede	larghezza [m]	un solo lato: 0,50 - 0,90 - 1,20 - 1,80
		entrambi i lati: 0,50 - 0,90 - 1,20
Uscite/Accessi Galleria	interdistanza [m]	300 - 500 - 1000 - 2000 - 4000
Porte Uscite/Accessi Galleria	larghezza [m]	0,60 - 1,20 - 1,80
Sistema di Ventilazione Longitudinale in Galleria	velocità aria [m/s]	1,00 - 2,00 - 3,00
Sistema di Illuminazione di Emergenza Galleria	illuminamento [lux]	1 - 2 - 3
Sistema di Illuminazione di Emergenza Treno	illuminamento [lux]	1 - 3 - 5
Sistema di Rilevazione Incendio e Comunicazione Allarme	tempo di rilevazione [s]	240 - 480 - 600

Tabella 11.3 - Misure di sicurezza e loro variabili di funzionamento.

I valori adottati per l'interdistanza tra uscite/accessi consecutivi derivano anch'essi dalle prescrizioni imposte dal D.M. 28/10/2005:

- finestre di accesso carrabili almeno ogni 4000 m in gallerie a singola canna;

- finestre di accesso non carrabili almeno ogni 2000 m in gallerie a singola canna, in alternativa al punto precedente;
- collegamenti trasversali tra le canne almeno ogni 500 m in gallerie a doppia canna.

Poiché i precedenti sono requisiti minimi, si sono voluti valutare due ulteriori valori di interdistanza più cautelativi dei precedenti, pari rispettivamente a 1000 m e 300 m.

Si precisa inoltre, che le variabili di funzionamento delle misure di sicurezza marciapiede e sezione trasversale, unitamente alla variabile interdistanza tra uscite/accessi consecutivi nella sua particolare connotazione di lunghezza efficace, assumono anche il significato di variabili di stato per l'intero sistema galleria a cui appartengono, in quanto né definiscono le principali caratteristiche costitutive di tipo strutturale.

Il campo di variabilità della larghezza delle porte di uscite/accessi intermedi, primaria responsabile della formazione di eventuali fenomeni di accodamento lungo i marciapiedi presenti in galleria, sebbene non esplicitamente annoverata dal disposto normativo né tra i requisiti minimi né tra quelli integrativi, è stato comunque attenzionato e determinato considerando il cosiddetto "modulo uomo" o "modulo unitario di passaggio", rappresentante la larghezza sufficiente al transito di una persona, pari a 0,60 m e due suoi multipli, 1,20 m e 1,80 m.

Le dimensioni delle vie di esodo a bordo treno e delle relative porte di uscita/accesso, rimangono invariate in tutte le simulazioni condotte e pari a quelle del materiale rotabile adottato negli scenari base, ossia l'ETR500.

Il sistema di ventilazione longitudinale in galleria, che secondo il più volte citato D.M. 28/10/2005 rappresenta un requisito integrativo di sicurezza e dunque come tale non obbligatorio, ha come effetto quello di produrre un moto dell'aria unidirezionale (nella direzione voluta) che può globalmente sommarsi, nell'accezione algebrica, all'eventuale ventilazione naturale presente in galleria per effetto della differenza barometrica ai portali o per particolari condizioni meteorologiche agli stessi. Dunque, nel contesto delle presenti simulazioni, i valori assunti dalla variabile velocità dell'aria, che descrive il funzionamento del sistema, vanno intesi come componente scalare del vettore risultante dalla somma vettoriale della velocità naturale dell'aria e della velocità ad essa indotta meccanicamente.

Poiché nei sistemi galleria considerati esiste sempre una condizione di simmetria nei confronti dello sviluppo dell'incendio (focolaio centrale rispetto al treno e rispetto alla galleria) ma non nei confronti dell'esposizione (notevole differenza, circa il 40%, tra il

numero di persone presenti a destra ed a sinistra del focolaio), la direzione dell'aria si assume sempre orientata verso la parte di galleria soggetta al maggior numero di persone in esodo. Cosicché, a mero titolo esemplificativo, la velocità di 3 m/s potrà intendersi come somma concorde di una ventilazione meccanica di 2 m/s e di una modesta ventilazione naturale di 1 m/s o in maniera del tutto equivalente come somma discorde di una ventilazione meccanica di 4 m/s e di una debole ventilazione naturale di 1 m/s.

Il sistema di illuminazione di emergenza in galleria, così come l'analogo sistema a bordo treno, rappresenta un requisito minimo di sicurezza che va sempre garantito.

Il D.M. 28/10/2005 prescrive in galleria un livello di illuminazione medio non inferiore a 5 lux ad un metro dal piano di calpestio, ed un illuminamento puntuale sempre sullo stesso piano, almeno pari ad 1 lux. Tenendo conto dei mutui condizionamenti tra i sistemi di illuminazione di emergenza in galleria ed a bordo treno e delle analoghe prestazioni che entrambi gli impianti sono chiamati ad assicurare, nelle simulazioni si è deciso di testare il solo impianto in galleria e di estendere successivamente i risultati raggiunti anche all'impianto a bordo treno.

Poiché il modello numerico di simulazione adottato (FDS+EVAC) non permette di contemplare direttamente l'effetto delle condizioni di illuminazione dell'ambiente galleria ex ante nei confronti dell'esodo, ma solo l'effetto dell'attenuazione di visibilità (ritenuta originariamente ottima) ad opera dei fumi prodotti dall'incendio, si è deciso di valutare le prestazioni dell'impianto di illuminazione di emergenza in funzione dei valori assunti dalla sua variabile di funzionamento, in termini indiretti o di fumo equivalente che già fin dall'inizio, prima che si manifestasse l'incendio, avrebbe dovuto essere presente in galleria per determinare il passaggio da una condizione di ottima visibilità (fissata, concordemente ai dati presenti in letteratura, in un illuminamento di 50 lux) ad una che si vuole testare (5 lux, 3 lux ed 1 lux).

Si sono utilizzate le note leggi dell'illuminotecnica che opportunamente combinate, hanno permesso il calcolo dell'intensità luminosa **I** di una sorgente tubolare (caratterizzata da intensità luminosa ed illuminamento costanti al variare dell'angolo di osservazione) che produce in un generico punto un illuminamento **E** voluto, in presenza del fenomeno di assorbimento luminoso in un mezzo di propagazione omogeneo (i fumi della combustione) caratterizzato da un fattore di estinzione **k**.

L'equazione fondamentale della fotometria nota pure come legge dell'inverso del

quadrato della distanza sorgente-punto, consente di calcolare l'intensità luminosa I in assenza di assorbimento:

$$I = \frac{2E \cdot L}{h} \cdot \sqrt{\left(h^2 + r^2\right)} \cdot \left(\frac{L}{L^2 + r^2 + h^2} + \frac{1}{\sqrt{h^2 + r^2}} \cdot \operatorname{arctg} \frac{L}{\sqrt{h^2 + r^2}} \right)^{-1} \qquad (11.1)$$

dove

- **I** intensità luminosa [candele],
- **E** illuminamento [lux],
- **h** altezza della sorgente dal piano illuminato [m],
- **r** proiezione orizzontale della distanza sorgente-punto [m],
- **L** lunghezza della sorgente luminosa tubolare [m].

L'equazione che esprime la seconda legge di Bougier permette di calcolare la perdita di intensità luminosa nell'attraversamento di una sostanza assorbente secondo una curva di decadimento esponenziale:

$$I = I_0 \cdot e^{-kD} \qquad (11.2)$$

dove

- **I** intensità luminosa [cd] dopo l'attraversamento del mezzo assorbente,
- **I_0** intensità luminosa [cd] prima di attraversare il mezzo assorbente e calcolata con la formula (11.1) impostando E = 50 lux,
- **K** fattore di estinzione o di assorbimento lineare del fumo [m^{-1}],
- **D** distanza percorsa dalla luce all'interno del mezzo assorbente [m].

La distanza D percorsa dalla luce nell'attraversamento del fumo, coincide con il percorso sorgente - punto illuminato ed è quindi pari alla quantità $(h^2 + r^2)^{1/2}$ in cui i termini che in essa compaiono sono già noti.

Sostituendo il primo termine dell'equazione (11.2) con il secondo termine dell'equazione (11.2) in cui va introdotto il valore di illuminamento E da testare (5 lux, 3 lux ed 1 lux), si ottiene il valore dell'unica incognita presente, ossia il termine k, che introdotto infine nell'espressione (11.3) utilizzata dal software EVAC per descrivere l'effetto del fumo sull'esodo delle persone esposte in termini di variazione della velocità di evacuazione da v_0 (velocità base o indisturbata) a v (velocità condizionata dal fumo), si ottiene in termini

equivalenti di velocità di esodo l'effetto della variazione della variabile di funzionamento del sistema di illuminazione di emergenza.

$$v = v_0 \cdot f = v_0 \cdot (1 - 0{,}0807 \cdot k) \tag{11.3}$$

Si riportano Tabella 11.4 i diversi fattori di riduzione f della velocità base v_0 nei diversi sistemi galleria simulati e per le diverse condizioni impiantistiche.

Fattore riduttivo della velocità di esodo f			
larghezza marciapiede [m]	**Illuminamento E [lux]**		
	5	**3**	**1**
0,50	0,83	0,79	0,71
0,90	0,84	0,81	0,75
1,20	0,86	0,83	0,77
1,80	0,88	0,86	0,82

Tabella 11.4 - Fattori di riduzione della velocità di esodo in funzione del valore di illuminamento.

I sistemi di rilevazione incendio e di comunicazione allarme rappresentano, ai sensi del DM 28/1072005 dei requisiti minimi di sicurezza.

Il sistema di rilevazione incendio ed il sistema di comunicazione allarme, comunque realizzati e messi in atto, hanno come variabile di funzionamento globalmente rappresentativa, il tempo: di rilevazione incendio nel primo caso, di comunicazione allarme nel secondo caso.

Il tempo di rilevazione è pari all'intervallo temporale intercorrente tra l'inizio della combustione ed il raggiungimento di un valore di soglia prestabilito per l'agente assunto quale rilevatore dell'incendio (fumo, calore, fiamme, combinazioni dei precedenti).

Nel caso di assenza di sistemi automatici, la precedente definizione continua a valere con la precisazione che in tal caso non si ha un valore di soglia da raggiungere ma un tempo legato all'insorgenza dei primi prodromi d'incendio nelle persone presenti all'interno del sistema galleria, sia viaggiatori che personale di bordo.

Questa seconda accezione di significato permette comunque di evidenziare che affinché siano avvertiti gli occupanti del convoglio ferroviario della presenza di incendio non è

sufficiente il solo sistema di rilevazione incendio, ma risulta indispensabile la presenza del sistema di comunicazione allarme.

Il tempo di comunicazione è pari all'intervallo temporale intercorrente tra l'avvenuta rilevazione dell'incendio e l'esplicito avvertimento delle persone di essere esposte al flusso del pericolo da incendio. Nel caso di assenza di sistemi automatici, la precedente definizione ancora una volta continua a valere con la precisazione che in tal caso la diffusione dell'allarme dipenderà dalla comunicazione verbale tra i soggetti esposti.

Tenuto conto che l'intervallo temporale complessivamente intercorrente tra l'inizio della combustione e l'avvertimento delle persone della presenza di incendio, coincide, per definizione, con il tempo di percezione dei soggetti esposti, nelle simulazioni condotte si è globalmente verificata l'efficacia prestazionale del sistema di rilevazione-comunicazione incendio in termini indiretti, ossia procedendo alla variazione dei tempi di percezione liberamente imputabili all'interno del programma EVAC.

Il tempo di percezione, che unitamente al tempo di reazione costituisce quello che comunemente viene definito tempo di pre-movimento, è stato determinato sommando i valori assunti dalle variabili di funzionamento dei singoli sistemi di rilevazione e comunicazione incendio.

In particolare, per il sistema di rilevazione, considerando la presenza di un impianto automatico con cavo termosensibile, sebbene le diverse curve temperatura-tempo concordino nel fissare il raggiungimento della temperatura standard di intervento, pari a 68°C, in un tempo di circa 20 secondi, si assume cautelativamente, tenendo conto dell'inerzia richiesta dal sistema per attivarsi, dei controlli e delle ridondanze interne che evitano i falsi allarmi, delle possibili barriere frapposte tra focolaio e cavo che ne ritardano il processo di rilevazione, il seguente tempo di rilevazione $\mathbf{t_r}$:

- t_r = 120 s per tutti gli scenari incidentali EI_10, EI_50 ed EI_100

Inoltre si considera il caso di assenza o di mancato funzionamento del sistema automatico di rilevazione, assumendo in questo caso un tempo pari a:

- t_r = 300 s, per rilevazione visivo-olfattiva da parte dei soggetti esposti.

Per il tempo di comunicazione $\mathbf{t_c}$, si sono considerati due generici valori rappresentativi delle diverse soluzioni progettuali con cui può ritenersi presente nel sistema galleria l'impianto di comunicazione allarme:

- t_c = 120 s, per sistema automatico sonoro e/o visivo;
- t_c = 180 s, per sistema semiautomatico con diffusori acustici.

La seconda modalità prima elencata rappresenta lo standard di progettazione FS che prevede la realizzazione in galleria di telefoni vivavoce SOS ogni 250 m ed altoparlanti per la diffusione sonora ogni 30 m, con disposizione lungo il lato di ogni marciapiede e schema a centri affacciati se in galleria a singola canna e doppio binario.

Inoltre si considera il caso di assenza o di mancato funzionamento del sistema automatico o semiautomatico di comunicazione incendio, assumendo in questo caso un tempo di:

- t_c = 300 s, per comunicazione verbale tra i soggetti esposti.

Tenuto conto delle possibili modalità di realizzazione del sistema di rilevazione-comunicazione incendio e delle conseguenti combinazioni dei tempi prima indicati, discendono tre soluzioni impiantistiche con i seguenti tempi caratteristici:

- 240 s, per sistema automatico, con rilevatori e dispositivi di allarme;
- 480 s, per sistema semiautomatico, con rilevazione visivo-olfattiva e diffusori acustici;
- 600 s, nel caso di rilevazione visivo-olfattiva e comunicazione verbale tra i soggetti esposti (assenza del sistema automatico e non funzionamento del sistema semiautomatico).

Complessivamente, quindi, per il sistema di rilevazione-comunicazione incendio il tempo di percezione è stato considerato variabile, per ogni scenario incidentale base fissato, nel dominio discreto di valori 240 s, 480 s, 600 s.

11.2.3 Scenari Rilevanti di Progetto

Tenuto conto sia degli obiettivi che dei possibili sviluppi del presente studio, nonché dei vincoli fisici legati alle elaborazioni numeriche, tra gli oltre quattromila scenari derivati ne sono stati selezionati 58, che assumono il significato di scenari rilevanti di progetto. Di questi: 28 sono scenari derivati dallo scenario base EI_10, 15 sono scenari derivati dallo scenario base EI_50 e 15 sono scenari derivati dallo scenario base EI_100.

codice		GALLERIA		MISURE DI SICUREZZA						
		TIPOLOGIA SCAVO DIREZIONALITA'	MAGNITUDO	SEZIONE	LARGHEZZA MARCIAPIEDI	INTERDISTANZA USCITE / ACCESSI DI EMERGENZA	LARGHEZZA PORTE USCITE DI EMERGENZA	SISTEMA DI VENTILAZIONE LONGITUDINALE	SISTEMA DI ILLUMINAZIONE DI EMERGENZA	SISTEMA DI RILEVAZIONE E COMUNICAZIONE ALLARME
1	EI_10_01	Naturale Meccanizzato Monodirezionale	10 MW	71 mq	1,80 m	300 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
2	EI_10_02					500 m				
3	EI_10_03					1000 m				
4	EI_10_04					2000 m				
5	EI_10_05					4000 m				
6	EI_10_06			59 mq	1,20 m	300 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
7	EI_10_07					500 m				
8	EI_10_08					1000 m				
9	EI_10_09					2000 m				
10	EI_10_10					4000 m				
11	EI_10_11			53 mq	0,90 m	300 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
12	EI_10_12					500 m				
13	EI_10_13					1000 m	0,60 m			
14	EI_10_14						1,20 m	3 m/s		
15	EI_10_15							1 m/s	5 lux	
16	EI_10_16								3 lux	240 s
17	EI_10_17									480 s
18	EI_10_18									600 s
19	EI_10_19								1 lux	480 s
20	EI_10_20							2 m/s	3 lux	
21	EI_10_21						1,80 m	1 m/s		
22	EI_10_22					2000 m	1,20 m			
23	EI_10_23					4000 m				
24	EI_10_24			47 mq	0,60 m	300 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
25	EI_10_25					500 m				
26	EI_10_26					1000 m				
27	EI_10_27					2000 m				
28	EI_10_28					4000 m				
29	EI_50_01	Naturale Meccanizzato Bidirezionale	50 MW	117 mq	1,20 m	1000 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
30	EI_50_02			107 mq	0,90 m	300 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
31	EI_50_03					500 m				
32	EI_50_04					1000 m	0,60 m			
33	EI_50_05						1,20 m	3 m/s		
34	EI_50_06							1 m/s	5 lux	
35	EI_50_07								3 lux	240 s
36	EI_50_08									480 s
37	EI_50_09									600 s
38	EI_50_10								1 lux	480 s
39	EI_50_11							2 m/s	3 lux	
40	EI_50_12						1,80 m	1 m/s		
41	EI_50_13					2000 m	1,20 m			
42	EI_50_14					4000 m				
43	EI_50_15			94 mq	0,60 m	1000 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
44	EI_100_01		100 MW	117 mq	1,20 m	1000 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
45	EI_100_02			107 mq	0,90 m	300 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s
46	EI_100_03					500 m				
47	EI_100_04					1000 m	0,60 m			
48	EI_100_05						1,20 m	3 m/s		
49	EI_100_06							1 m/s	5 lux	
50	EI_100_07								3 lux	240 s
51	EI_100_08									480 s
52	EI_100_09									600 s
53	EI_100_10								1 lux	480 s
54	EI_100_11							2 m/s	3 lux	
55	EI_100_12						1,80 m	1 m/s		
56	EI_100_13					2000 m	1,20 m			
57	EI_100_14					4000 m				
58	EI_100_15			94 mq	0,60 m	1000 m	1,20 m	1 m/s	3 lux	480 s

Figura 11.10 - Riepilogo dei 58 scenari rilevanti di progetto.

Ciascuno dei 58 scenari rilevanti di progetto è riassunto in Figura 11.10 in cui sono riportati i relativi parametri di input utilizzati per la simulazione, un numero d'identificazione progressivo e generale (da 1 a 58), nonché il codice alfanumerico identificativo rispetto allo scenario base da cui esso è derivato.

11.3 QUANTIFICAZIONE DEL FLUSSO DEL PERICOLO

Con l'utilizzo combinato del codice di calcolo numerico FDS+EVAC è stato possibile ottenere, come risultato di ogni simulazione, gli output necessari alla caratterizzazione degli **stati di emergenza** ("microclima" interno alla galleria) **e di fine emergenza** per il sistema galleria grazie alla contemporanea simulazione del processo condizionato di esodo delle persone esposte. In sintesi è stato possibile studiare l'intero flusso del pericolo, dal suo principium in funzione della sorgente, al suo exitus in relazione ai bersagli colpiti.

Il numero delle vittime, variabile rappresentativa del danno ai ricettori sensibili, assunto quale indicatore assoluto di danno globale per il sistema galleria, consente una precisa caratterizzazione quantitativa della magnitudo delle conseguenze di ogni scenario, ma soprattutto il confronto e la gerarchizzazione dell'intera classe di scenari secondo una precisa scala di danno, in cui la differenza di posizione occupata, risulta unicamente imputabile all'efficacia delle misure di sicurezza presenti.

Nella Tabella 11.5 vengono riportati in ordine progressivo di numerazione, per ciascuno degli scenari incidentali rilevanti di progetto, il numero di vittime $\mathbf{N_i}$ ed il relativo indicatore assoluto di danno globale per il sistema galleria $\mathbf{IG_i}$, adimensionale, ottenuto dalla normalizzazione di N_i rispetto al numero totale di passeggeri $\mathbf{N_{pass}}$.

Procedendo con una analisi statistica dei risultati ottenuti, tutti derivanti da rami tra di loro incompatibili di alberi degli eventi rappresentanti scenari incidentali mutuamente disgiunti, è possibile ottenere su un piano F-N la curva della frequenza complementare o retrocumulata, la cui area sottesa rappresenta una quantità proporzionale al valore atteso del danno (ossia il rischio individuale) per il complesso dei 58 distinti sistemi galleria simulati. E' necessario evidenziare che, non essendo la classe di simulazioni omogeneamente riferibile ad un unico sistema galleria, reale o ideale che sia, perde di significato il confronto con le soglie di non accettabilità, accettabilità condizionata ed accettabilità del rischio, stabilite dal Decreto Ministeriale 28/10/2005.

SCENARIO	vittime	IG
EI_10_01	0	0,0000
EI_10_02	0	0,0000
EI_10_03	0	0,0000
EI_10_04	250	0,3765
EI_10_05	170	0,2560
EI_10_06	0	0,0000
EI_10_07	0	0,0000
EI_10_08	71	0,1069
EI_10_09	255	0,3840
EI_10_10	255	0,3840
EI_10_11	0	0,0000
EI_10_12	0	0,0000
EI_10_13	255	0,3840
EI_10_14	0	0,0000
EI_10_15	152	0,2289
EI_10_16	0	0,0000
EI_10_17	168	0,2530
EI_10_18	238	0,3584
EI_10_19	178	0,2681
EI_10_20	0	0,0000
EI_10_21	170	0,2560
EI_10_22	255	0,3840
EI_10_23	255	0,3840
EI_10_24	7	0,0105
EI_10_25	139	0,2093
EI_10_26	235	0,3539
EI_10_27	255	0,3840
EI_10_28	255	0,3840
EI_50_01	247	0,3720

SCENARIO	vittime	IG
EI_50_02	0	0,0000
EI_50_03	0	0,0000
EI_50_04	255	0,3840
EI_50_05	0	0,0000
EI_50_06	255	0,3840
EI_50_07	179	0,2696
EI_50_08	255	0,3840
EI_50_09	255	0,3840
EI_50_10	255	0,3840
EI_50_11	1	0,0015
EI_50_12	255	0,3840
EI_50_13	255	0,3840
EI_50_14	255	0,3840
EI_50_15	355	0,5346
EI_100_01	387	0,5828
EI_100_02	28	0,0422
EI_100_03	410	0,6175
EI_100_04	590	0,8886
EI_100_05	255	0,3840
EI_100_06	582	0,8765
EI_100_07	352	0,5301
EI_100_08	597	0,8991
EI_100_09	655	0,9864
EI_100_10	598	0,9006
EI_100_11	255	0,3840
EI_100_12	596	0,8976
EI_100_13	571	0,8599
EI_100_14	570	0,8584
EI_100_15	617	0,9292

Tabella 11.5 - Numero di vittime N ed indicatore di danno IG per gli scenari rilevanti di progetto.

Ciò nonostante, con le precisazioni prima fatte, risulta comunque utile calcolare la frequenza complementare o retrocumulata[19] per avere una base di osservazione più chiara

[19] In statistica descrittiva la frequenza cumulata associata ad una modalità o ad una classe di modalità è pari alla somma della sua frequenza assoluta e di quelle delle modalità che la precedono.

rispetto alla gravità delle conseguenze ed al loro manifestarsi.

Si definisce frequenza cumulata F' la somma delle frequenze f_N degli eventi incidentali che hanno un numero di vittime N_i minore ad una soglia prefissata N* per il valore di N:

$$F' = \sum_{i=1}^{N^*-1} f_{N_i} \qquad \text{con } N_i < N^* \tag{11.4}$$

Allora, la frequenza cumulata complementare o retrocumulata F risulta semplicemente il complemento ad 1 della frequenza cumulata F', ovvero la somma delle frequenze f_N degli eventi incidentali che hanno un numero di vittime N maggiore o uguale ad una soglia prefissata N* per il valore di N:

$$F = 1 - F' \tag{11.5}$$

$$F = \sum_{i=N^*}^{m} f_{N_i} \qquad \text{con } N_i \geq N^* \tag{11.6}$$

dove m è il massimo numero di fatalità ottenuto come risultato delle simulazioni.

La frequenza f_N del generico evento incidentale con un numero di vittime N, si calcola dal rapporto tra n_N, pari al numero di volte in cui nelle simulazioni si è ottenuto il valore di N, ed il numero totale delle simulazioni effettuate n_{TOT}, che nel caso in esame è pari a 58:

$$f_N = \frac{n_N}{n_{TOT}} = \frac{n_N}{58} \qquad \text{con } N_i \geq N^* \tag{11.7}$$

La soglia N* viene fissata di volta in volta coincidente con i valori ottenuti dalle simulazioni per il numero di vittime N dei diversi scenari incidentali considerati.

Affinché il calcolo della frequenza cumulata abbia un senso è necessario che all'interno della distribuzione si sia generato un qualche ordinamento.

Concetto inverso rispetto a quello di frequenza cumulata è quello di frequenza retrocumulata ove il processo di sommatoria ha inizio con la modalità più alta.

N	n_N	f_N	F'	F
0	13	0,224	0,000	1,000
1	1	0,017	0,224	0,776
7	1	0,017	0,241	0,759
28	1	0,017	0,259	0,741
71	1	0,017	0,276	0,724
139	1	0,017	0,293	0,707
152	1	0,017	0,310	0,690
168	1	0,017	0,328	0,672
170	2	0,034	0,345	0,655
178	1	0,017	0,379	0,621
179	1	0,017	0,397	0,603
235	1	0,017	0,414	0,586
238	1	0,017	0,431	0,569
247	1	0,017	0,448	0,552
250	1	0,017	0,466	0,534
255	17	0,293	0,483	0,517
352	1	0,017	0,776	0,224
355	1	0,017	0,793	0,207
387	1	0,017	0,810	0,190
410	1	0,017	0,828	0,172
570	1	0,017	0,845	0,155
571	1	0,017	0,862	0,138
582	1	0,017	0,879	0,121
590	1	0,017	0,897	0,103
596	1	0,017	0,914	0,086
597	1	0,017	0,931	0,069
598	1	0,017	0,948	0,052
617	1	0,017	0,966	0,034
655	1	0,017	0,983	0,017

Tabella 11.6 - Frequenza cumulata F' e frequenza retrocumulata F.

Riportando le coppie di punti F,N di Tabella 11.6 su un diagramma in cui in ascisse viene posto il numero di vittime normalizzato rispetto al numero di utenti esposti ed in ordinate la frequenza cumulata complementare, si ottiene la curva retrocumulata a gradini diagrammata in Figura 11.11.

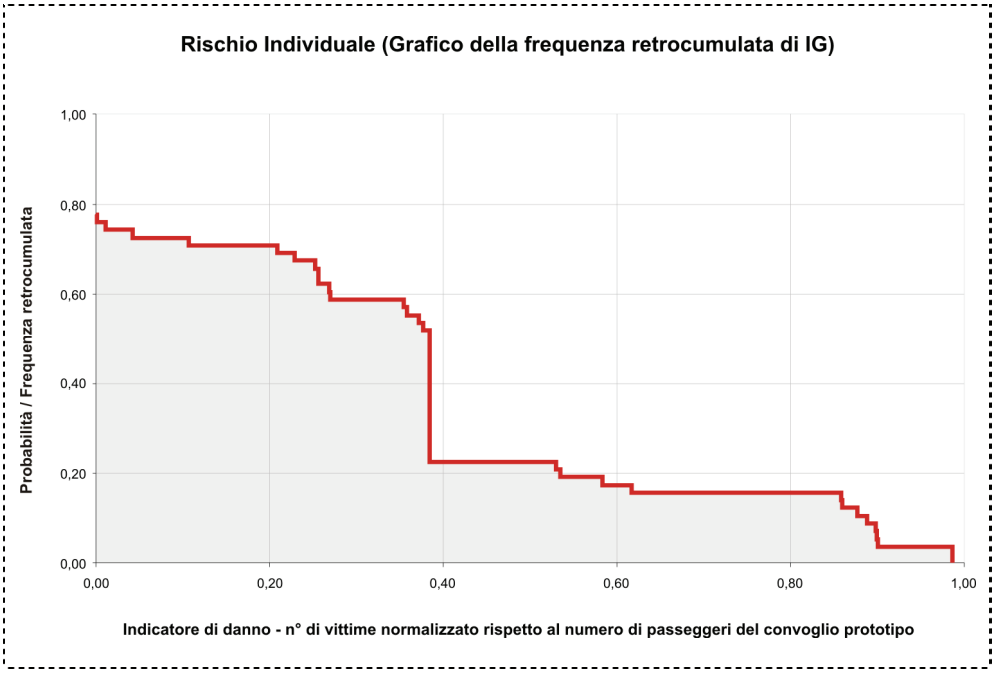

Figura 11.11 - Grafico della frequenza retrocumulata per il numero di vittime normalizzato.

L'area A sottesa dalla curva retrocumulata, proporzionale al valore atteso del danno, ovvero proporzionale al rischio individuale IR, per il complesso dei 58 distinti sistemi galleria simulati, è data dall'espressione seguente.

$$A = \frac{1}{N_{pass}} \cdot \sum_{i=1}^{m} \left(F_{i+1} - F_i\right) \cdot N_{i+1} = \frac{1}{N_{pass}} \cdot \sum_{i=1}^{m} f_{N_i} \cdot N_i \qquad \text{con } N_i \geq N^* \qquad (11.8)$$

Non è stata effettuato un ulteriore approfondimento dei risultati ottenuti dalle 58 simulazioni in quanto si è voluto fornire con essi esclusivamente una base per l'ulteriore e più precisa validazione del modello.

Una trattazione statistica precisa, atta a definire una "Analisi prestazionale delle misure di sicurezza antincendio" a partire dai dati sviluppati in questa tesi si ritrova nel lavoro del dott. ing. Marco Santo SPINELLI [75].

CAPITOLO 12

CONCLUSIONI

12.1 CONCLUSIONI

La realizzazione di tutte le condizioni di sicurezza in tutte le condizioni di esercizio deve essere garantita per ogni opera ingegneristica e ciò vale in particolar modo per i tunnel ferroviari che si configurano come opere ad elevatissimo rischio per via del grande numero di vittime che una tale infrastruttura può produrre in circostanze catastrofiche.

Il DM 28/10/2005 definisce sicurezza in caso d'incendio "l'insieme di misure, provvedimenti, accorgimenti e attenzioni intesi ad evitare, in accordo secondo le norme emanate dagli organi competenti, l'insorgere di un incendio e a limitarne le conseguenze".

Il problema della sicurezza in galleria è dunque una questione complessa che riguarda aspetti molteplici, difficilmente analizzabili fuori dal contesto stesso.

Ad ogni incidente corrisponde un evento critico iniziatore. In galleria ferroviaria gli eventi critici cui deve farsi riferimento per la valutazione del rischio sono l'incendio, il deragliamento e la collisione. Di questi tre scenari incidentali appare di particolare rilievo quello d'incendio poiché uno scenario di questo tipo può degenerare velocemente verso condizioni di totale insostenibilità dell'ambiente, mettendo a serio rischio la sopravvivenza delle persone nelle fasi successive all'incidente stesso.

Al fine di meglio comprendere il rischio connesso al fenomeno dell'incendio in galleria, sono stati analizzati numerosi testi e diverse normative tecniche. In particolare è apparso opportuno approfondire il quadro normativo nazionale ed internazionale con ovvio riferimento al DM 28/10/2005 "Sicurezza nelle gallerie ferroviarie" che introduce la logica moderna dell'approccio prestazionale nella valutazione degli obiettivi di sicurezza, in contrapposizione al vecchio approccio prescrittivo.

L'impostazione innovativa del DM 28/10/2005 si traduce, fondamentalmente, nell'introduzione dell'Analisi di Rischio come strumento di progetto e verifica della sicurezza.

L'analisi di rischio permette infatti di affrontare i temi complessi, cercando di coglierne gli elementi critici e individuando le priorità e le modalità di intervento.

Il vecchio approccio “deterministico / prescrittivo” era fondato sull’assunto per cui le misure di riduzione del danno sono note a priori ed è solo la loro corretta applicazione a permettere di raggiungere i risultati prefissati.

Al contrario, il nuovo approccio “probabilistico / prestazionale” si basa sull’assunto che non esista il rischio zero, ma che per poter ridurre il rischio occorra innanzitutto conoscerlo e quantizzarlo, dopodiché è possibile intervenire sulle problematiche di maggiore rilevanza e poi, mano a mano, su quelle probabilisticamente meno significative.

Con particolare riferimento al fenomeno dell’incendio, la metodologia dell’analisi di rischio si traduce nella delega della capacità predittiva ai moderni software di simulazione che assumono così il ruolo di strumenti chiave nella valutazione del danno conseguente ad opportuni scenari preventivamente identificati, al fine di potere legare rischio e probabilità e verificare che la probabilità di un incidente grave sia contenuta entro livelli accettabili.

A tal proposito, dopo avere studiato la struttura del software FDS+EVAC ed avere inquadrato secondo le logiche della “Fire Safety Engineering” l’evoluzione del fuoco (e dei suoi prodotti) nonché gli aspetti critici del comportamento umano connessi all’evacuazione, è stato costruito e validato un modello base di riferimento, il cui processo di validazione si è concretizzato fondamentalmente nel confronto con l’esperienza reale dei test del Runehamar Tunnel (Norvegia, 2003), per i quali sono disponibili numerosi e dettagliati set di misurazioni.

Attraverso l’analisi di tutte le teorie che stanno alla base di ogni problematica connessa all’incendio in galleria, si è cercato di riproporre organicamente capitolo per capitolo, analizzando un vasto numero di fonti, l’aspetto critico di ogni questione al fine di coglierne l’essenza e riportare ogni discorso al contesto qui trattato.

Si è cercato cioè di stabilire concretamente come debbano essere costruiti e tarati gli input di un modello virtuale di incendio in galleria e di un sottomodello di simulazione dell’esodo affinché i risultati congiunti possano essere considerati attendibili ed estendibili a considerazioni successive.

Infine, una volta definita la struttura base del modello è stata costruita una serie di 58 scenari incidentali, derivati da una serie più ampia opportunamente costruita, con l’obiettivo principale di fornire, nel loro sviluppo e nel calcolo del numero di vittime di ogni scenario, una base dati per l’ulteriore e più precisa validazione del modello stesso.

Al contempo, il processo di costruzione dei 58 scenari anzidetti è stato condotto

coerentemente con i principi dell'analisi di rischio e pertanto fornisce anche la base per ulteriori sviluppi teorici del lavoro qui proposto.

Si ritiene pertanto che l'obiettivo di possedere uno strumento di valutazione del danno al ricettore uomo nel caso d'incendio in galleria ferroviaria sia stato ampiamente raggiunto, sia sotto l'aspetto teorico della raccolta dei dati e delle informazioni, che sotto l'aspetto tecnico sperimentale della corretta realizzazione delle elaborazioni.

L'implementazione di FDS sulla grid, la creazione di procedure semi-automatiche per la costruzione organica dei 58 scenari al variare delle variabili di progetto, nonché la creazione di una serie di script atti a trasformare l'informazione CAD in input FDS ed a snellire le operazioni di pura compilazione degli input, si configurano come notevoli risultati poiché permettono di estendere, con studi successivi, il percorso compiuto ad un secondo e più alto livello di ricerca e dare un contributo sostanziale al processo di sviluppo della sicurezza.

12.2 SULL'ASPETTO TECNICO DELLE SIMULAZIONI

Al fine di meglio comprendere il lavoro di questa tesi è opportuno soffermarsi sulla potenza di calcolo che è stata necessaria allo sviluppo delle 58 simulazioni descritte ai paragrafi precedenti.

Ogni simulazione è stata condotta su griglie di calcolo di 0,30 x 0,30 x 0,30 m^3, simulando tratti di galleria variabili tra 500 m e 4000 m ed indagando sull'evoluzione temporale necessaria a definire totalmente il comportamento degli individui esposti, (raggiungimento e attraversamento dell'uscita di sicurezza o raggiungimento della soglia di incapacitazione e conseguente morte per asfissia).

In particolare sono stati simulati tratti variabili tra 522 m, nei casi in cui l'interasse tra le uscite di emergenza era di 300 m, e di 4176 m in quelle simulazioni in cui l'interasse tra le uscite era di 4000 m, con domini trasversali di 9,60 x 8,10 m^2 per gallerie a singolo binario e 12,00 x 9,00 m^2 nei casi di galleria a doppio binario, arrivando a definire 17.817.600 celle nel solo dominio FDS, con tempi di osservazione medi di circa 40 minuti.

Numeri di quest'ordine di grandezza sono improponibili su comuni calcolatori a singolo o multi core, anche di elevatissima potenza.

Considerando esclusivamente i tempi relativi alle 58 simulazioni finali, ad oggi nel 2009,

un personal computer single core di medie caratteristiche avrebbe impiegato circa 18 anni di calcolo consecutivi.

Si comprende facilmente come tale dato sia assolutamente improponibile e come la ricerca effettuata non avrebbe potuto concretizzarsi senza l'ausilio di una infrastruttura di calcolo dedicata. In altre parole, il lavoro di questa tesi è stato possibile esclusivamente attraverso l'utilizzo della grid[20] messa a disposizione dalla **V**irtual **O**rganization **COMETA** (**C**onsorzio **M**ulti **E**nte per la promozione e l'adozione di **T**ecnologie di calcolo **A**vanzato) nell'ambito del progetto **PI2S2** (**P**rogetto per l'**I**mplementazione e lo **S**viluppo di una e-**I**nfrastruttura in **S**icilia basata sul paradigma della GRID).

In particolare, grazie all'aiuto di alcuni ingegneri informatici dell'organizzazione COMETA nonché grazie anche ad interventi diretti degli stessi sviluppatori FDS, è stato possibile realizzare una vera e propria implementazione degli algoritmi FDS+EVAC sulla grid COMETA, sia effettuando modifiche strutturali al codice FDS (sorgente in FORTRAN ricompilato in ambiente linux a 64bit) che mettendo a punto una complessa serie di script per l'inizializzazione, il recupero e la gestione dei dati di input e output di ogni simulazione.

Sfruttando pienamente le potenzialità del calcolo parallelo **MPI** (**M**ultiple **P**arallel **P**rocessing) della grid e di FDS, si è arrivato ad utilizzare fino a più di 500 cpu (core) contemporaneamente, riducendo i tempi di calcolo delle 58 simulazioni a poco più di un mese consecutivo di elaborazioni.

Inoltre, oltre alla drastica riduzione dei tempi di calcolo, l'utilizzo della grid ha permesso di aggirare i problemi connessi all'allocazione della memoria virtuale[21].

---

[20] Il termine Griglia Computazionale (dall'inglese "Grid" o "Grid computing") sta ad indicare un paradigma del calcolo distribuito, di recente introduzione, costituito da un'infrastruttura altamente decentralizzata e di natura variegata in grado di consentire ad un vasto numero di utenti l'utilizzo di risorse (prevalentemente CPU e storage) provenienti da un numero indistinto di calcolatori (anche e soprattutto di potenza non particolarmente elevata) interconnessi da una rete.

[21] In linea di massima, FDS necessita di allocare circa 1 GB di memoria RAM per ogni milione di celle di calcolo, per cui a circa 17 milioni di celle dovrebbero corrispondere almeno 17 GB di RAM e sarebbero inevitabilmente necessarie macchine a 64 bit. Le attuali versioni commerciali di qualsivoglia sistema operativo sono distribuite quasi totalmente come sistemi a 32 bit e non permettono di gestire più di 3 GB di RAM per intrinseci limiti informatici.

BIBLIOGRAFIA

1 Rew, C. and Deaves, D., "Fire spread and flame length in ventilated tunnels - a model used in Channel tunnel assessments", Proceedings of the International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, 397-406, Lyon, France, 5-7 May, 1999

2 "Fire and Smoke Control in Road Tunnels", PIARC, 05.05B-1999, 1999.

3 Andersen, T. and Paaske, B. J., "Railroad and Metro Tunnel Accidents", Det Norske Veritas (DNV), http://home.no.net/lotsberg/artiklar/andersen/en_table_1.html.

4 Carvel, R. O. and Marlair, G., "A history of fire incidents in tunnels". In The handbook of Tunnel Fire Safety (A. N. Beard and R. O. Carvel, Eds.), Thomas Telford Publishing, 3-41, London, UK, 2005.

5 Thamm, B., "The new EU directive on road tunnel safety", Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, SP Report 2004:05, 19-30, Borås, Sweden, 20-21 November, 2003.

6 Ingason, H., "Fire Development in Catastrophic Tunnel Fires (CTF)", International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 31-47, Borås, Sweden, 20-21 November, 2003.

7 Bettelini, M., Neuenschwander, H., Henke, A., Gagliardi, M., and Steiner, W., "The Fire in the St Gotthard Tunnel of October 24, 2001", International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires (CTF), 49-68, Borås, Sweden, 20-21 November, 2003.

8 Høj, N. P., "Guidelines for Fire Safe Design Compared Fire Safety Features for Road Tunnels", 1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels, 127-138, Prague, Czech Republic, 4-6 February, 2004.

9 Zuber, P., "Compared Safety Features for Rail Tunnels", 1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels, 139-148, Prague, Czech Republic, 4-6 February, 2004.

10 Gabay, D., "Compared Fire Safety Features for Metro Tunnels", 1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels, 149-156, Prague, Czech Republic, 4-6 February, 2004.

11 Bendelius, A., "Tunnel ventilation - state of the art". In The Handbook of Tunnel Fire Safety (A. N. Beard and R. O. Carvel, Eds.), Thomas Telford Publishing, 127-143, London, UK, 2005.

12 Lacroix, D., "New French Recommendations for Fire Ventilation in Road Tunnels", 9th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, Aosta Valley, Italy, 6-8 October, 1997.

13 NFPA 502, "Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways", 2001 ed., National Fire Protection Association, 2001.

14 Lacroix, D., "Guidelines for Fire Safe Design: Synthesis and Current Harmonisation Processes", 1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels, 107-115, Prague, Czech Republic, 4-6 February, 2004.

15 Brousse, B., "Comparison of Fire Safety Problems for the Various Transport Modes in Tunnels", 1st International Symposium on Safe & Reliable Tunnels, 117-126, Prague, Czech Republic, 4-6 February, 2004.

16 ISO 834-1, "Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements", First ed., 1999-09-15, International Organization for Standardization, 1999.

17 EN 1363-2, "Fire resistance tests - Part 2: Alternative and additional procedures", First ed., 1999-09-24, European Committee for Standardization, 1999.

18 "Richtlinien für Ausstattung und Betrieb von Tunneln (RABT)", Ausgabe 1985 ed., Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 1985.

19 "Beproeving van het gedrag bij verhitting van twee isolatiematerialen ter bescherming van tunnels bij brand", Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, B-79-391, Delft, The Netherlands, 1979.

20 "Rapport betreffende de beproeving van het gedrag van twee isolatiematerialen ter bescherming van tunnels tegen brand", Instituut TNO voor Bouwmaterialen en Bouwconstructies, Rapport B-80-33, Delft, The Netherlands, 1980.

21 "Systems and Equipment for Fire and Smoke Control in Road Tunnels", PIARC Committee on Road Tunnel Operation (C-5), Working group No. 6.

22 Lacroix, D. and Haack, A., "PIARC Design Criteria for Resistance to Fire for Road Tunnel Structures", In Joint Issue ITA/PIARC of Route-Roads on Fire Safety in Tunnels, 2004.

23 Russell, H. A., "ITA Guidelines for Structural Fire Resistance of Road Tunnels", In Joint Issue ITA/PIARC of Route-Roads on Fire Safety in Tunnels, 2004.

24 Babrauskas, V. and Peacock, R. D., "Heat Release Rate: The Single Most Important Variable in Fire Hazard", Fire Safety Journal, 18, 255-272, 1992.

25 Huggett, C., "Estimation of Rate of Heat Release by Means of Oxygen Consumption Measurements", Fire and Materials, 4, 2, 61-65, 1980.

26 Lönnermark A., “On the Characteristics of Fires in Tunnels”, Doctoral Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, 2005.

27 "Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program - Test Report", Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration, 1995.

28 Heselden, A., "Studies of fire and smoke behavior relevant to tunnels", 2nd Int Symp on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, J1-1 -- J1-18, Cambridge, UK, 23-25 March, 1976.

29 Heselden, A. J. M., "Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels", Building Research Establishment, CP 66/78, Borehamwood, UK, 1978.

30 Studiensgesellschaft Stahlanwendung e. V., EUREKA-Project EU499:FIRETUN, Düsseldorf, Germany, 1995.

31 "State of the Road Tunnel Equipment in Japan - Ventilation, Lighting, Safety Equipment", Public Works Research Institute, Technical note, Vol. 61, Japan, 1993.

32 Lemaire, A., van de Leur, P. H. E., and Kenyon, Y. M., "Safety Proef: TNO Metingen Beneluxtunnel - Meetrapport", TNO, TNO-Rapport 2002-CVBR05572, 2002.

33 Haerter, A., "Fire Tests in the Ofenegg-Tunnel in 1965", International Conference on Fires in Tunnels, SP REPORT 1994:54, 195-214, Borås, Sweden, 10-11 October, 1994.

34 ILF, "Brandversuche in einem Tunnel", Ingenieurgemeinschaft Lässer-Feizlmayr; Bundesministerium f. Bauten u. Technik, Strassenforschung, P0244, 1976.

35 Pucher, K., "Fire Tests in the Zwenberg Tunnel (Austria)", International Conference on Fires in Tunnels, 187-194, Borås, Sweden, 1994.

36 Kunikane, Y., Kawabata, N., Ishikawa, T., Takekuni, K., and Shimoda, A., "Thermal Fumes and Smoke Induced by Bus Fire Accident in Large Cross Sectional Tunnel", The fifth JSME-KSME Fluids Engineering Conference, Nagoya, Japan, 17-21 November, 2002.

37 "Project 'Safety Test' - Report on Fire Tests", Directorate-General for Public Works and Water Management, Utrecht, The Netherlands, 2002.

38 Beyler, C. L., "Fire Plumes and Ceiling Jets", Fire Safety Journal, 11, 53-75, 1986.

39 McCaffrey, B., "Flame height". In The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (P. J. DiNenno, Ed.), National Fire Protection Association, 2-1 - 2-8, 1995.

40 Heskestad, G., "Fire Plumes, Flame Height, and Air Entraiment". In The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (P. J. DiNenno, Ed.), National Fire Protection Association, 2-1 -- 2-17, Quincy, Massachusetts, USA, 2002.

41 Heskestad, G., "Luminous Heights of Turbulent Diffusion Flames", Fire Safety Journal, 5, 103-108, 1983.

42 Heskestad, G., "Dynamics of the Fire Plume", Phil. Trans. R. Soc. Lond., 356, 2815-2833, 1998.

43 Heskestad, G., "Flame Height of Fuel Arrays with Combustion in Depth", Fire Safety Science - Proceedings of the Fifth International Symposium, 427- 438, Melbourne, Australia, 3-7 March, 1997.

44 Heskestad, G., "Fire Plumes", Chapter 2-2, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Society of Fire Protection Engineers, Quincy MA, USA, 1995.

45 Babrauskas, V., "Flame Lengths under Ceiling", Fire and Materials, 4, 3, 119-126, 1980.

46 Alpert, R. L., "Calculation of Response Time of Ceiling - Mounted Fire Detectors", Fire Technology, 8, 3, 181-195, 1972.

47 Alpert, R. L., "Ceiling Jet Flows". In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (P. J. DiNenno, Ed.), National Fire Protection Association, 2-18 -- 2-31, Quincy, MA, USA, 2002.

48 Oka, Y., "Flame Behaviour in a Tunnel", Third International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, 159-168, Nice, France, 9-11 March, 1998.

49 Kuwana, H., "Scale Effect on Temperature Properties in Tunnel Fire", Third International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, 87-96, Nice, France, 9-11 March, 1998.

50 Rew, C. and Deaves, D., "Fire spread and flame length in ventilated tunnels - a model used in Channel tunnel assessments", Proceedings of the International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, 397-406, Lyon, France, 5-7 May, 1999.

51 Kurioka, H., Oka, Y., Satoh, H., and Sugawa, O., "Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels", Fire Safety Journal, 38, 319-340, 2003.

52 Oka, Y., Kurioka, H., "Effect of shape and size of a Fire Source in Vicinity of a Fire Source in a tunnel", Fire Science and Technology, Vol. 25, 15-29, 2006.

53 Zukoski, E. E., "Fluid Dynamic Aspects of Room Fires", Proceedings of the First International Symposium on Fire Safety Science, 1-30, Gaithersburg, USA, 7-11 October, 1985.

54 Alpert, R. L. and Ward, E. J., “Evaluating Unsprinklered Fire Hazards”, SFPE Technology Report 83-2, Society of Fire Protection Engineers, Boston; MA, 1983.

55 Fire Dynamics Tools (FDTs) - Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program. http://www.nrc.gov/reading-rm.html.

56 Heskestad, G., and Delichatsios, M. A., “The Initial Convective Flow in Fire,” 17th International Symposium on Combustion, Combustion Institute, Pittsburgh , 1978, pp. 1113-1123.

57 NISTIR 6178 - “An algorithm for estimating the plume centerline temperature and ceiling jet temperature in the presence of a hot upper layer”, 1998.

58 Kevin B. McGrattan, Anthony Hamins, “Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001”, NISTIR 6902, Fire Research Division Building and Fire Research Laboratory, August 2002.

59 Sascia Canale, Salvatore Leonardi “Appunti di: Teoria delle Infrastrutture Viarie”, Collana di Quaderni Didattici n.5 -2003, Università degli Studi di Catania - Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale.

60 Carvel R. O. “Fire Size in Tunnels”, Doctoral Thesis for the degree of Doctor of Philosophy, Heriot-Watt University - School of the Built Environment - Division of Civil Engineering Riccarton, Edinburgh EH14 4AS.

61 Heselden, A. J. M., "Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels", Building Research Establishment, CP 66/78, Borehamwood, UK, 1978.

62 G.W. Mulholland, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, chapter Smoke Production and Properties, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts, 3rd edition, 2002. 98, 99.

63 Nathaniel Mead Petterson, “Assessing the Feasability of Reducing the Grid Resolution in FDS Field Modelling”, Fire Engineering Research Report 20002/6, ISSN 1173-5996.

64 Heskestad, G. and Hamada, T., "Ceiling Jets of Strong Fire Plumes", Fire Safety Journal, 21, 69-82, 1993.

65 McCaffrey, B., "Flame height", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (P. J. DiNenno, Ed.), National Fire Protection Association, 2-1 - 2-8, 1995.

66 Purser, D.A., “Toxicity Assessment of Combustion Products”, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., pp. 2/28-2/146, National Fire Protection Association, Quincy, MA, 1995.

67 Jin, T., “Visibility trough fire smoke", Part 5. Allowable smoke density for escape from fire”, Fire Research Institute of Japan, 42, 1975.

68 Babrauskas, V., “Technical Note 1103”, National Bureau of Standards, 1103, Washington, 1979.

69 ISO/TS 13571:2002, “Life threat from fires - Guidance on the estimation of time available for escape using tire data”, ISO, ISO/TS 1357 1:2002,2002.

70 Spearpoint M., Fleischmann C., “Numerical Simulation of a Metro Train Fire”, Fire Engineering Research Report 05/1, June 2005.

71 European Thematic Network Fire in Tunnels - Technical report par 1 "Design fire scenarios", Rapporteur: Alfred Haack (STUVA).

72 NIST Fire Dynamics Simulator - Technical reference guide, K. McGrattan.

73 NIST Fire Dynamics Simulator - User’s guide, K. McGrattan.

74 Fire Dynamics Simulator with Evacuation, FDS+Evac Technical Reference and User’s Guide, Timo Korhonen and Simo Hostikka, VTT Technical Research, Finland.

75 “Sicurezza nelle gallerie ferroviarie: Analisi prestazionale delle misure di sicurezza antincendio”, dott. ing. Marco Santo SPINELLI Tesi di Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Infrastrutture Viarie XXI Ciclo.